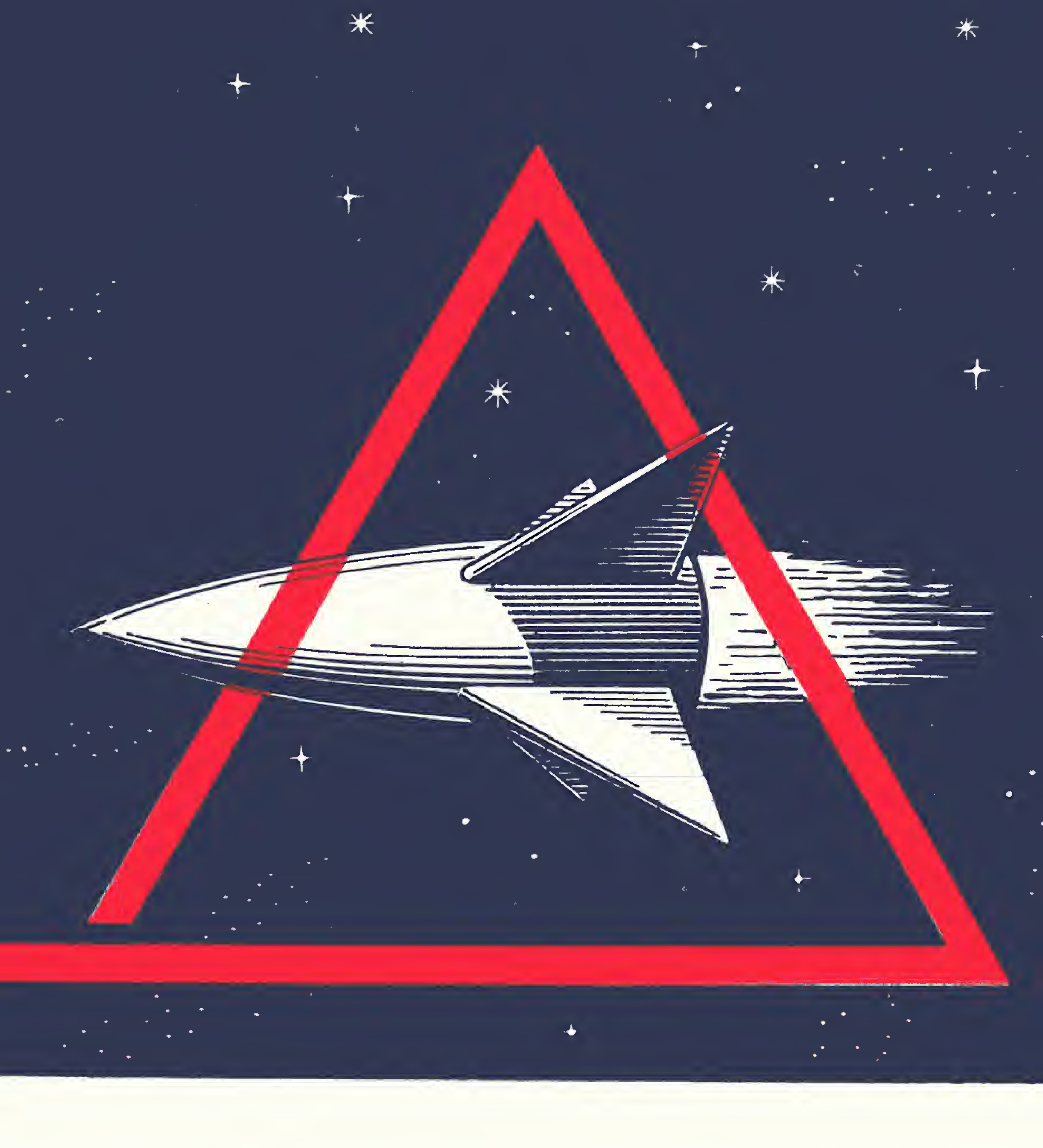


А. Д. БОГДАНОВ

ГИРОСКОПЫ НА ЛАЗЕРАХ

А. Д. БОГДАНОВ

ГИРОСКОПЫ НА ЛАЗЕРАХ

Ордена Трудового Красного Знамени
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
Москва — 1973

УДК 621.37 : 527.622(023)
6Ф4
Б73

А. Д. Богданов

Б73 Гироскопы на лазерах. М., Воениздат, 1973.

72 стр.

Квантовая радиоэлектроника, лазеры на земле, в космосе и под водой, локаторы на лазерах... — такие выражения (в которых неизменно присутствуют слова «квантовая», «лазеры») все чаще и чаще встречаются на страницах ежедневных, периодических, научно-популярных и научных изданий. Квантовая электроника и лазеры находят все большее применение в самых различных областях науки и техники. Эта брошюра поможет ознакомиться с еще одним практическим использованием лазеров в технике сегодняшнего дня. Итак, «Гироскопы на лазерах».

Брошюра научно-популярная, но предполагается, что читатель имеет общее представление о гироскопах и лазерах. Фактический материал взят из открытой отечественной и зарубежной литературы.

$Б \frac{1124\text{-}016}{068(02)\text{-}73}$ 102-72

6Ф4

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие техники в последние десятилетия неразрывно связано с совершенствованием различных систем управления движущимися объектами. Системы управления торпедами, морскими кораблями, самолетами, ракетами и космическими объектами трудно представить себе без гироскопических приборов.

Чувствительным элементом в таких системах, как правило, является гироскоп. Гироскоп — это динамически сбалансированное тело вращения, которое с большой скоростью поворачивается вокруг оси, укрепленной в рамке, и имеет, по крайней мере, одну неподвижную точку.

Первое практическое применение гироскоп нашел в 1852 году, когда французский ученый Л. Фуко с помощью гироскопа подтвердил свой эксперимент с маятником, доказавший вращение Земли. Первые гироскопы имели большие погрешности, обусловленные несбалансированностью отдельных частей прибора, инерцией рамок, люфтами в соединениях, неравномерным трением в опорах кардана и т. п.

Эти же факторы являются основными источниками ошибок и у большинства современных гироскопических приборов, хотя сами ошибки стали значительно меньшими.

С момента опыта Фуко прошло более 100 лет, и весь этот период в развитии гироскопических приборов и систем был связан с борьбой за повышение точности их работы.

Погрешности гироскопических приборов непрерывно уменьшались, но также постоянно возрастали требования к точности сохранения быстровращающимся телом своего пространственного положения.

Так как ошибки приборов уменьшаются с увеличением массы ротора гироскопа и скорости его вращения и с уменьшением трения в осях подвеса, то конструкторы вынуждены были создавать массивные роторы и увеличи-

вать скорости вращения их до десятков тысяч оборотов в минуту. Оси роторов стали помещать в подшипники самых различных конструкций. Были отработаны шариковые и роликовые подшипники, оси подвеса стали укреплять в весьма твердых опорах из драгоценных и полудрагоценных материалов, использовали различные смазки и даже изготовили гироскопы с подшипниками на воздушной подушке.

Достаточно широкое распространение получили поплавковые гироскопы. В приборах такой конструкции давление некоторых осей вращения гироскопов на подшипники было уменьшено до предела за счет погружения кожуха ротора в жидкость.

Все это привело к тому, что лучшие электромеханические гироскопы (их еще можно назвать инерционными) имеют «уход» не более 0,001 *град/ч.*

Под «уходом» или «дрейфом» гироскопа следует понимать угловую скорость прецессии, возникающую в результате действия сил трения в подшипниках подвеса, несбалансированности ротора гироскопа и т. д. Незначительное дальнейшее уменьшение «ухода» приводит к значительному удорожанию стоимости гироскопических приборов. Но и эти весьма дорогие приборы не удовлетворяют сегодня создателей космических кораблей и другой новейшей техники.

Гироскопическим приборам с вращающимся ротором свойственны и многие другие недостатки. В частности, они требуют значительного времени на приведение их в полную готовность, не выдерживают больших перегрузок, потребляют значительное количество электрической энергии.

Конструкторы гироскопов, начав искать новые принципы построения приборов, пытаются отказаться от применения тяжелого механического ротора. В настоящее время созданы и продолжают разрабатываться вибрационные гироскопы (на камертонной основе), гироскопы, использующие электростатический и электромагнитный подвесы ротора, корпускулярные гироскопы и др. К чему приведут испытания таких гироскопов, говорить еще рано, но ученые продолжают поиски.

В результате бурного развития новой области человеческих знаний — квантовой электроники был создан гироскопический прибор нового типа — лазерный гироскоп, к знакомству с которым и приглашается читатель.

Глава I

ПРИНЦИП РАБОТЫ, УСТРОЙСТВО И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ЛАЗЕРОВ

При написании брошюры предполагалось, что читатель знаком с основными понятиями из теории гироскопических приборов и квантовой электроники. Тем не менее автор считает необходимым напомнить некоторые теоретические положения, на которых базируется весь последующий материал.

Основы теории гироскопов разработали Л. Эйлер, Л. Фуко, Ш. Лагранж, С. Ковалевская и другие ученые XVIII—XIX вв. Значительный вклад в развитие теории гироскопов внесли и советские ученые.

В наши дни гироскопические приборы и системы применяются в самых различных областях техники: для автоматического управления и навигации, для стабилизации оружия на военных кораблях и танках, в горнорудной и нефтяной промышленности для прокладки шахт и туннелей, при бурении нефтяных скважин и т. д.

С помощью гироскопических приборов определяют направление истинного меридиана и величину отклонения от истинной вертикали, измеряют углы отклонения, угловые скорости и ускорения маневрирующего объекта.

Гироскопические приборы относят к основным элементам инерционных систем наведения, используемых для управления большинством иностранных баллистических ракет. Особое значение приобрели гироскопические приборы в системах навигации.

1.1. Физические основы работы гироприборов

В зависимости от числа степеней вращения гироскопы бывают одностепенные, двухстепенные и трехстепенные (свободные). Кроме того, различают сбалансированные и несбалансированные (тяжелые) гироскопы. Каждый вид гироскопа имеет свои особенности. Эти особенности и позволили широко использовать гироскопы в очень многих отраслях современной техники.

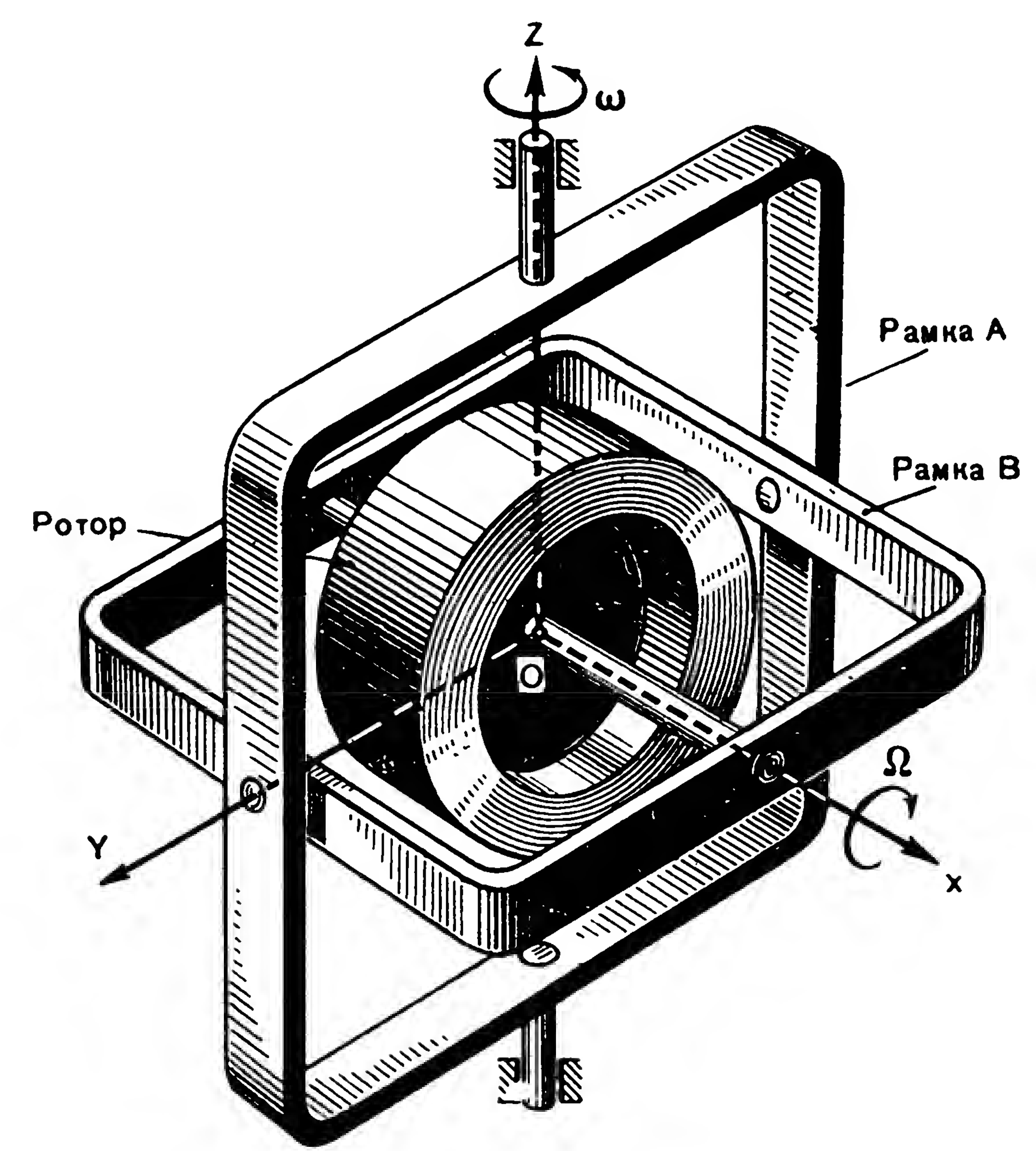


Рис. 1. Трехстепенной гироскоп

Рассмотрим кратко принцип действия трехстепенного гироскопа (рис. 1). Ротор на подшипниках устанавливается внутри рамки B и вращается с большой скоростью вокруг оси OX. Рамка B может свободно поворачиваться вокруг оси OY во внешней рамке A. Последняя в свою очередь имеет свободу поворота вокруг оси OZ.

Следовательно, гироскоп в таком подвесе (карданов подвес) имеет три степени свободы.

Ось OX называется осью собственного вращения гироскопа. При одновременном повороте ротора относительно оси собственного вращения с угловой ско-

ростью Ω и относительно оси OZ с угловой скоростью ω (рис. 2) каждая элементарная частица ротора (например, a_1 и a_2) участвует как бы в двух движениях. В этом случае эти частицы ротора находятся под действием кориолисова ускорения, вектор $\bar{\omega}_c$ которого направлен перпендикулярно плоскости ротора. Сила инерции $\bar{F}_и$, противодействующая вынужденному повороту, равна произведению элементарной массы ротора на кориолисово ускорение, т. е.

$$\bar{F}_и = m \cdot \bar{\omega}_c .$$

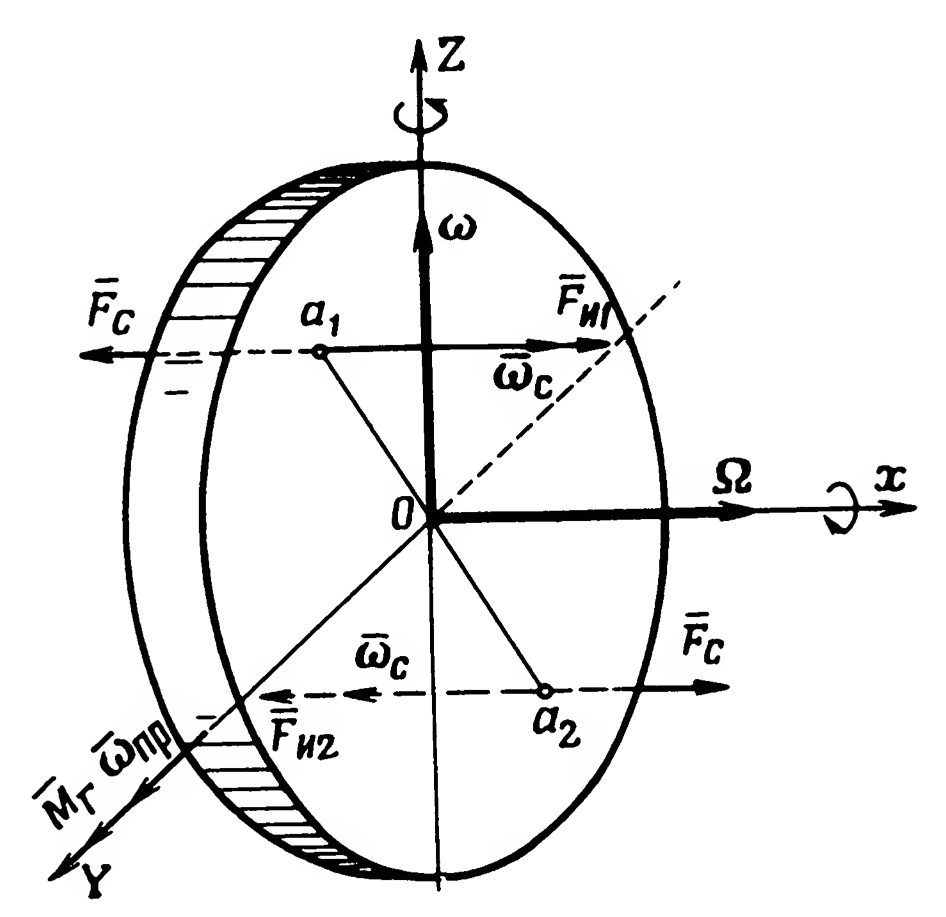


Рис. 2. Схема сил и моментов, действующих на ротор гироскопа

Сила инерции ротора (для точек a_1 и a_2 — это пара сил $F_{и1}$ и $F_{и2}$) вызывает момент $M_г$ поворота ротора вокруг оси OY. При этом никакого поворота относительно оси OZ практически не происходит.

Момент $M_г$ называют гироскопическим моментом. Он поворачивает ротор с угловой скоростью $\omega_{пр}$ вокруг оси OY. Это движение называют прецессионным движением или прецессией гироскопа.

Как уже отмечалось, трехстепенной гироскоп обладает тремя степенями свободы, поэтому поворота вокруг оси OZ быть не может. В силу этого ось ротора гироскопа неподвижна в пространстве.

Рассмотрим в качестве примера принцип угловой стабилизации ракеты относительно ее центра масс с применением инерционного трехстепенного гироскопа (рис. 3).

Гироскоп $Г$ задает углом ψ программное направление продольной оси OX ракеты. При отклонении продольной оси ракеты на угол $\Delta\psi$ от программного направления с помощью гироскопа измеряется этот угол и специальный датчик выдает на усилитель-преобразователь

напряжение, пропорциональное углу $\Delta\psi$. Полярность и фаза напряжения зависят от направления и величины отклонения продольной оси ракеты от программного направления. После усиления и преобразования в усилителе-преобразователе сигнал *СУ* поступает на привод управления рулями, которые и устраняют отклонение ракеты.

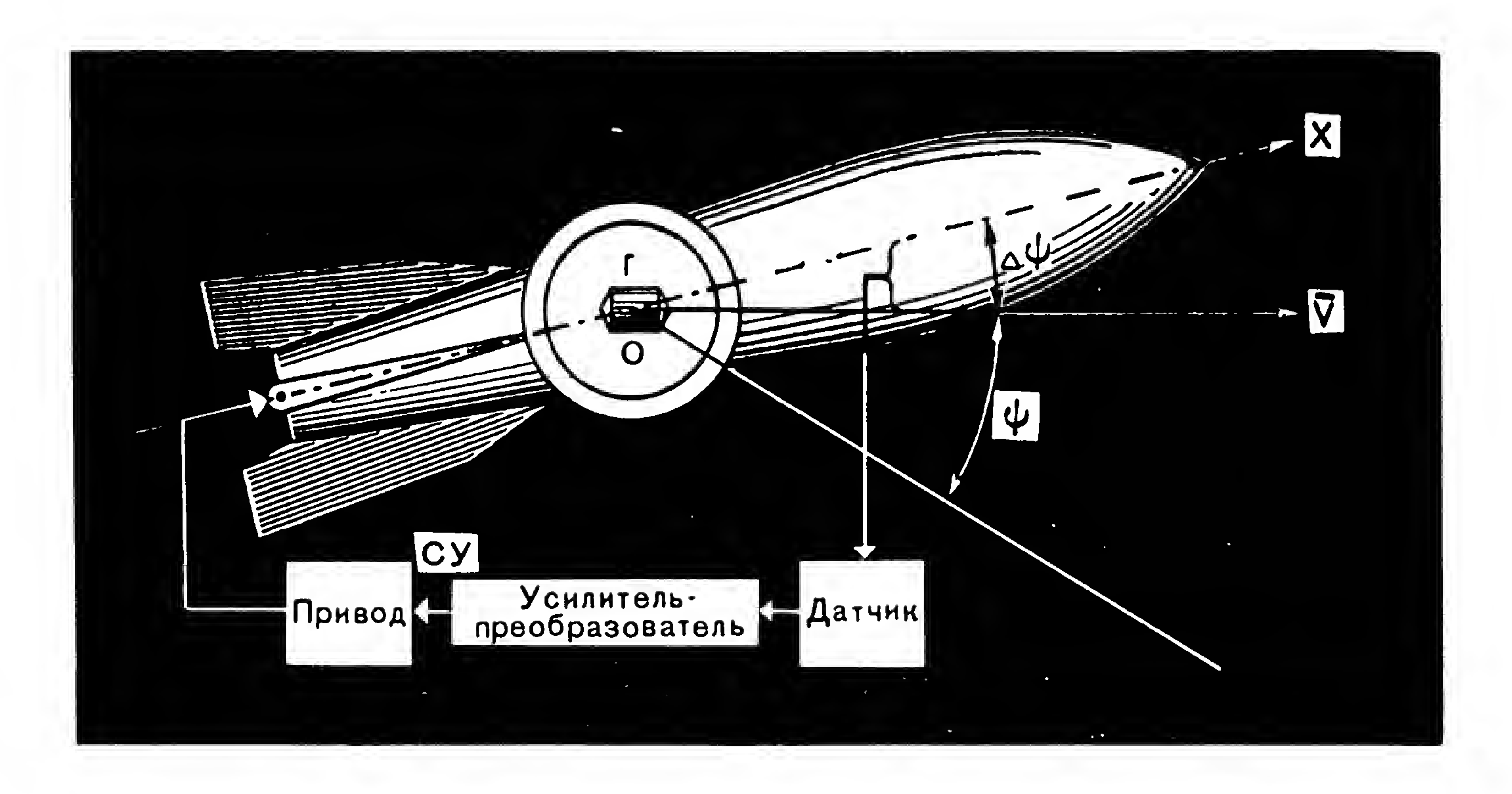


Рис. 3. К пояснению принципа угловой стабилизации ракеты

Все существующие гироскопы, и особенно инерционные, не могут достаточно долго сохранять ось собственного вращения неподвижной. В силу ряда причин рамки гироскопа произвольно перемещаются. В результате гироскопы измеряют углы, угловые скорости и т. д. с определенными погрешностями. Погрешности инерционных гироскопических приборов и систем вызываются в основном несбалансированностью отдельных элементов, инерцией рамок, нежесткостью деталей и люфтами в отдельных соединениях, трением в опорах кардана и другими причинами.

Величина этих отклонений (погрешностей) обусловлена также несовершенством технологии изготовления отдельных деталей и узлов.

Электромеханические гироскопы наиболее просты по конструкции и, как правило, имеют небольшие размеры. Однако в силу перечисленных недостатков они имеют значительные погрешности, вследствие чего затрудняется решение ряда задач навигации самолетов, космической

навигации и т. д. За рубежом были проведены дорогостоящие исследования с целью уменьшения погрешностей электромеханических гироскопов и получены определенные результаты (табл. 1). Однако перечисленные в табл. 1 гироскопы, хотя и обладают относительно малым дрейфом, могут решать задачи управления, морской, воздушной и космической навигации лишь приблизительно, со значительными ошибками.

Трудности уменьшения дрейфа электромеханических гироскопов и улучшения их технических характеристик привели к появлению гироскопов, основанных на других физических принципах работы. В табл. 2 даны некоторые технические характеристики последних зарубежных гироскопов. Анализируя табл. 2, можно оценить их технические характеристики и перспективность использования.

Таблица 1

Наименование навигационной системы	Фирма	Год выпуска	Национальная принадлежность	Летательный аппарат	Тип гироскопа	Дрейф гироскопа, *град/ч*	Точность* системы навигации, *км/ч*
SYG-1000	„Сперри“	1961	США	—	Поплавковый	0,01	7,2
SYG-10	„Сперри“	1965	США	„Боинг-707“	Поплавковый интегрирующий	0,02—0,03	Около 5,5
SP-500	„Ферранти“	1965	Англия, Франция	Орбитальный	То же	Около 0,01	2—3

* Под точностью системы навигации следует понимать величину линейной ошибки в определении местоположения летательного аппарата (в километрах) за один час работы навигационного устройства.

Таблица 2

Наименование гироскопа	Вид подвеса	Состояние работ	Перспективность	Основные характеристики	
				носитель кинетического момента (ротор)	величина дрейфа или чувствительность
Электромеханический	Подшипники „Роторейс“	Серийное производство	Малоперспективен	Обычно бронза	0,1—0,4 *град/ч*
Поплавковый	Комбинация механического и гидростатического подвеса	То же	То же	Ротор, бронза, бериллий и др.	0,01—0,03 *град/ч*
С электростатическим подвесом	Электростатический	В разработке	Перспективен	Полая сфера, бериллий	10^{-4}—10^{-5} *град/ч*
Криогенный	Электромагнитный	То же	То же	Полая сфера, титан и ниобий	Дрейф определяется порогом чувствительности последних усилительных устройств
Гидродинамический	Подшипники	„	„	Жидкость с большим удельным весом	0,01 *град/ч*
Магнитогидравлический	Механический	Разработан	„	Жидкость, обычно ртуть	Дрейф обратно пропорционален габаритам
Корпускулярный	Подвес отсутствует	В стадии исследований	Перспективен	Частицы гелия и других инертных газов	Дрейф 10^{-4}—10^{-6} *град/ч*

Продолжение

Наименование гироскопа	Вид подвеса	Состояние работ	Перспективность	Основные характеристики: носитель кинетического момента (ротор)	Основные характеристики: величина дрейфа или чувствительность
Гиротрон	Нет вращающихся частей	В разработке	Перспективен по мере усовершенствования	Упругие инерционные массы	
Лазерный	То же	Экспериментальные образцы	Перспективен	Нет	Дрейф отсутствует, чувствительность до 0,01 *град/ч*
Электровакуумный	Подвес в условиях невесомости	В стадии исследований	Перспективен для искусственных спутников земли	Сферический ротор	0,01″*год*
Гироскоп, работа которого основана на вихревом принципе	Нет подвеса	То же	Перспективен	Жидкость или газ	
Гелитроновый	То же	„	То же	Плазма	
Кольцевой джозефсоновский	Нет вращающихся частей	„	„	Поток электронов	10^{-4}—10^{-5} *град/ч*
Кольцевой нерезонансный с использованием радиоволн	То же	В производстве	Малоперспективен	Нет	0,01—0,001 *град/ч*

По данным иностранной печати, наиболее перспективным из современных гироскопов, находящихся в стадии испытаний, является лазерный гироскоп. Так как в таких гироскопах лазеры имеют резонаторы в виде замкнутого кольца, их часто называют кольцевыми. Какие же свойства лазерных гироскопов сделали возможным использовать их в качестве чувствительных элементов в системах управления, стабилизации летательных аппаратов и особенно в системах космической навигации? Для этого обратимся к табл. 3, в которой лазерный гироскоп сравнивается с одним из самых современных, используемых сейчас для вышеуказанных целей, — поплавковым гироскопом. При этом не следует думать, что лазерный гироскоп может во всех случаях заменить обычный, т. е. электромеханический. Тем не менее из табл. 3 можно сделать следующие важные выводы:

Таблица 3

Наименование гироскопа	Величина дрейфа	Готовность к работе	Наименьшая угловая скорость вращения	Чувствительность к линейным ускорениям	Наименьший угол поворота
Поплавковый	0,01 *град/ч*	20—30 *мин*	До 0,001 *град/ч*	Чувствителен	До 1,5′
Лазерный	До 0,2″/*ч*	Несколько миллисекунд	0,1 *град/ч*	Нечувствителен	До 1″

1. Лазерный гироскоп может работать в условиях больших перегрузок. В его конструкции отсутствуют вращающиеся части, наличие которых обусловливает появление дисбаланса массы. Поэтому большие ускорения не столь существенно влияют на работу гироскопа.

2. Гироскопы, используемые в системах наведения ракет и самолетов, обладающих высокими скоростными характеристиками, должны измерять угловые скорости в широком диапазоне. Современные гироскопы на лазерах позволяют измерять угловые скорости до 12 000 *град/сек* и выше. Другие лазерные гироскопы могут измерять угловые скорости в 0,001—0,002 *град/сек*.

3. Для летательных аппаратов особенно важна мгновенная готовность их к использованию. К числу борто-

вых устройств, требующих значительного времени на подготовку, до последнего времени относили гироскопические приборы. Так, например, поплавковые гироскопы требуют на подготовку не менее 20—30 *мин.* Лазерные гироскопы готовы к работе непосредственно после включения, что выгодно отличает их от большинства других гироскопов.

4. Гироскоп на лазерах потребляет обычно всего лишь несколько ватт электроэнергии и является наиболее экономичным в энергетическом отношении.

5. В иностранных системах навигации, как правило, используют цифровые вычислительные машины. Гироскоп на лазерах выдает выходной сигнал в виде цифрового кода, что позволяет удобно сочетать его с навигационным устройством. Кроме того, лазерный гироскоп в силу своих свойств может быть использован в бесплатформенных авиационных навигационных системах, когда гироскопические датчики жестко закреплены на борту летательного аппарата.

6. Отсутствие движущихся деталей делает лазерный гироскоп в принципе более надежным, чем электромеханический.

Все указанные и некоторые другие преимущества открывают перед лазерным гироскопом широкие перспективы его использования.

1.2. Физические основы работы лазеров

Оптическими квантовыми генераторами (ОКГ) называют приборы, в которых используется явление вынужденного излучения для генерации когерентных электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне электромагнитного спектра волн.

Явление вынужденного (стимулированного, индуцированного) излучения было вначале использовано для усиления и генерации электромагнитных колебаний в СВЧ-диапазоне, в области микроволн (0,34—10 *мм*). Приборы для усиления и генерации электромагнитных колебаний в этом диапазоне волн получили название «мазеры» от первых букв английских слов «microwave amplification by stimulated emission of radiation», что означает «усиление микроволн с помощью вынужденного излучения».

Появившиеся позднее приборы, работающие в оптическом диапазоне волн, т. е. оптические квантовые генераторы и усилители, стали называть оптическими мазерами или лазерами. Термин «лазер» образовался в результате замены буквы «м» в слове «мазер» на букву «л» (от английского слова light — свет) и означает усиление света с помощью вынужденного излучения. Термин «свет» означает здесь излучение не только в видимой (0,38—0,77 *мкм*), но также в ультрафиолетовой (0,01—0,38 *мкм*) и инфракрасной (0,77—340 *мкм*) областях спектра электромагнитных колебаний.

Термины выбраны не совсем удачно, но получили широкое распространение и, по-видимому, не имеет смысла вводить новые.

Квантовая электроника, объяснившая принцип работы лазеров, начала свое существование в 1954—1955 годах. Теоретическое обоснование и создание оптических квантовых генераторов можно поставить в один ряд с крупнейшими научными и техническими достижениями. Развитие квантовой электроники неразрывно связано с именами советских ученых Н. Г. Басова, А. М. Прохорова, А. Л. Микаэляна и других. За открытие нового принципа генерации и усиления Н. Г. Басову и А. М. Прохорову в 1959 году была присуждена Ленинская премия. В 1964 году за фундаментальные исследования в области квантовой электроники Н. Г. Басову, А. М. Прохорову и американскому ученому Ч. Таунсу была присуждена Нобелевская премия по физике.

За последние 10 лет на базе первых рубиновых лазеров (1960—1961 гг.) создан целый ряд современных квантовомеханических приборов различного назначения и конструкции: твердотельные, газовые, жидкостные, полупроводниковые лазеры.

К ОКГ проявляется огромный интерес. Только в США несколько сот фирм заняты поисками новых материалов для лазеров, улучшением характеристик существующих приборов, изучением их свойств.

ОКГ применяют для сварки металлов, резки алмазов и проделывания в них мельчайших отверстий, для измерения углов, расстояний, скоростей, в хирургии, в научных исследованиях, в военном деле и т. д.

ОКГ — это принципиально новые источники оптического излучения, в которых в качестве первичной может быть использована энергия любого вида, в том числе

и энергия излучения обычного источника света. Первичная энергия переводит некоторые атомы вполне определенного вида с основного энергетического уровня на более высокий. Благодаря этому излучение лазеров обладает высокой монохроматичностью, когерентностью, направленностью и большой плотностью мощности. Кроме этого, излучение лазеров поляризовано.

Понятие «когерентность» означает связь или согласованность между фазами колебаний в различных точках пространства в один и тот же момент времени или между фазами колебаний в одной и той же точке в различные моменты времени. Свойства временной когерентности излучения лазеров наиболее широко используются в следующих случаях:

— для передачи информации на оптических частотах;

— во всевозможных опытах, связанных с интерференцией;

— для осуществления оптического гетеродинирования при приеме когерентных оптических сигналов;

— в стандартах частоты и времени.

Когерентность электромагнитных колебаний позволяет получить высоконаправленный световой пучок с чрезвычайно малыми поперечными размерами.

Поскольку излучение когерентно, фронт волны представляет собой, как правило, почти плоскость или часть сферы большого радиуса, т. е. ОКГ можно рассматривать как источник почти параллельных лучей с очень небольшой расходимостью. Эта расходимость определяется дифракцией на выходном отверстии. Причем направленность излучения лазеров достигается не в результате каких-либо приемов, как в обычных источниках, а благодаря самому характеру излучения. Тем не менее с помощью ОКГ нельзя создать идеально параллельный пучок, потому что когерентная волна будет дифрагировать на выходном отверстии.

Высокая направленность определяет следующие преимущества лазеров перед обычными источниками электромагнитного излучения:

а) чрезвычайно малые потери энергии, связанные с расходимостью пучка и с увеличением расстояния;

б) высокое угловое разрешение;

в) возможность пространственной фильтрации при приеме сигнала, осуществляемой с помощью пространственных фильтров.

Узконаправленное излучение может быть использовано:

— для передачи информации на большие расстояния;
— при передаче энергии на большие расстояния;
— при измерении углов и расстояний;
— в системах наведения по лучу и т. д.

В настоящее время с помощью лазеров экспериментально достигнуты плотности излучения, превышающие плотность излучения Солнца на несколько порядков. Колоссальная плотность излучения приводит к тому, что любое вещество мгновенно испаряется в месте фокусирования пучка. Кроме того, в веществе развивается световое давление, достигающее миллиона атмосфер.

Принцип работы лазеров. Рассмотрим некоторые теоретические предпосылки, позволяющие понять, почему работает лазерный генератор (ОКГ). Принцип работы ОКГ связан с оптическими свойствами особой так называемой инверсной среды. Как известно, частицы любой среды могут находиться в различных состояниях, отличающихся структурой электронного облака (электронные состояния) или характером относительного движения ионов в молекуле (колебательные и вращательные состояния). Возможные стационарные состояния образуют дискретную последовательность, которая определяет оптические свойства среды.

Известно, что атомы и ионы вещества при облучении их квантами света (фотонами) в состоянии поглощать энергию. При этом энергетическое состояние элементарных частиц вещества изменяется: атомы и ионы, получая дополнительную энергию и переходя на более высокие энергетические уровни, возбуждаются.

Из всех характеристик состояния нас будет интересовать прежде всего внутренняя энергия частицы. Эта энергия складывается главным образом из кинетической и потенциальной энергии электронов в электронном облаке атома или иона. В молекуле к этому добавляется кинетическая и потенциальная энергия относительного движения и расположения ионов, составляющих молекулу.

Степень энергетической возбужденности атомов и

ионов может быть различной. Энергетические уровни невозбужденных частиц вещества обычно называют основными. Основные энергетические уровни наиболее устойчивы. Частица в таком состоянии энергетически более устойчива и обладает меньшим запасом энергии. На основном энергетическом уровне частица может только поглощать энергию.

Кроме основного уровня частицы вещества могут находиться на других, более высоких энергетических уровнях. Частица, обладающая высоким энергетическим уровнем, может не только поглощать, но при некоторых условиях и излучать энергию в виде электромагнитного излучения. Переходы, в результате которых излучается или поглощается электромагнитная энергия, называются оптическими переходами. Значение частоты излучения элементарных частиц данного вещества зависит от того, с каких энергетических уровней и на какие эти частицы перешли. Если энергетические уровни частиц вещества меняются на некоторую определенную величину, то и частота излучения будет строго определенной. Но и в этом случае излучение может быть либо хаотическим (спонтанным), либо упорядоченным (индуцированным), вызванным какой-либо причиной.

При спонтанном излучении энергия излучается в виде некогерентных колебаний. Это значит, что атомы и ионы испускают фотоны самопроизвольно в различные моменты времени. При этом энергия излучается чаще всего в широком диапазоне частот.

Переход частиц с высшего энергетического уровня на низший под действием внешних причин (внешнего электромагнитного поля) называют индуцированным переходом. При таком переходе энергетический уровень изменяется сразу у значительного числа атомов и ионов, вызывая индуцированное излучение.

Индуцированное излучение — это одновременное синхронное излучение многих элементарных частиц вещества: такое излучение когерентно и происходит на частотах, занимающих узкий диапазон.

Среда, в которой происходят переходы частиц с одного энергетического уровня на другой, называется активной. Частицы активного вещества лазера возбуждаются с помощью специального внешнего источника энергии, который называют генератором накачки (подкачки).

Для того чтобы получить когерентное излучение, необходимо создать такие условия работы лазера, при которых переход энергии с высшего уровня на низший происходит упорядоченно под действием какой-либо внешней причины. Эти условия могут быть созданы в активном веществе, например, в том случае, если оно находится внутри резонатора.

Резонатор является важнейшей частью квантового генератора. Резонатор представляет собой устройство, аналогичное по назначению резонаторам радиотехнических устройств. Он имеет собственные резонансные частоты, одна из которых обязательно должна совпадать с частотой излучения лазера. Как правило, резонаторы образуются двумя плоскими, сферическими или параболическими зеркалами, установленными строго параллельно друг другу. Между ними располагается активное (рабочее) вещество. Такой резонатор часто называют открытым оптическим резонатором. Зеркала изготавливают с высокой точностью (до сотых и даже тысячных долей микрометра). Расстояние между отражающими поверхностями определяется в основном размерами активной среды и может колебаться от десятых долей миллиметра (в полупроводниковых ОКГ) до нескольких метров (в некоторых газовых лазерах).

Активная среда может занимать либо часть объема полости резонатора, либо весь объем (в этом случае в твердотельных и полупроводниковых лазерах отражающие поверхности создаются на торцах активного вещества).

Особое место занимает кольцевой резонатор, образованный отражающими поверхностями, расположенными по периметру некоторого замкнутого контура.

Для вывода из резонатора полезного излучения отражающие поверхности делают либо частично отражающими, либо одну полностью, а другую частично отражающей. С помощью многослойных диэлектрических покрытий удается получать коэффициент отражения более 99% на рабочей длине волны.

Основное назначение резонатора ОКГ — создание условий, при которых возникающее внутри него индуцированное излучение многократно проходит через активную среду. Другими словами, задачей резонатора является осуществление обратной положительной связи за счет

возвращения некоторой части распространяющегося между отражающими поверхностями излучения обратно в активную среду. Если бы излучение проходило через активную среду один раз, то мощность выходящего излучения была бы небольшой, кроме того, оно не имело бы преимущественного направления распространения. Если усиление в среде достаточно для компенсации потерь, мощность излучения будет нарастать до тех пор, пока скорость ухода энергии из резонатора не достигнет насыщения, определяемого скоростью появления возбужденных атомов и другими параметрами системы.

Основные виды потерь в резонаторе:

— рассеяние на неоднородностях активной среды;

— потери в зеркалах резонатора (потери на торцах активной среды);

— дифракционные потери.

Излучение ОКГ увеличивает свою мощность также и благодаря тому, что оно многократно проходит через инверсную среду, каждый раз получая усиление. При этом сохраняется фаза проходящего излучения, в результате чего излучение получается когерентным.

Процесс усиления тесно связан с направленностью излучения. Наибольшее число раз через активную среду пройдут лучи, распространяющиеся под наименьшим углом к продольной оси резонатора. Они в основном и будут определять выходную мощность.

В плоскопараллельном резонаторе достигается максимальная направленность излучения.

Таким образом, резонатор выполняет в ОКГ важнейшие функции, определяя как само существование генерации, так и основные свойства выходящего излучения.

1.3. Функциональная схема ОКГ

Отметим, какие элементы в лазере являются основными. Это — активное вещество, система накачки и резонатор.

Наличие их необходимо и достаточно для получения лазерного эффекта. Однако при практическом применении ОКГ обычно требуются дополнительные устройства и системы, обеспечивающие работоспособность прибора или служащие для управления излучением. К ним следует отнести;

— систему охлаждения активного вещества и элементов системы подкачки;
— систему модуляции излучения ОКГ;
— внешнюю оптическую систему;
— устройство для контроля параметров излучения;
— устройства для управления лучом;
— устройство селекции типов колебаний.

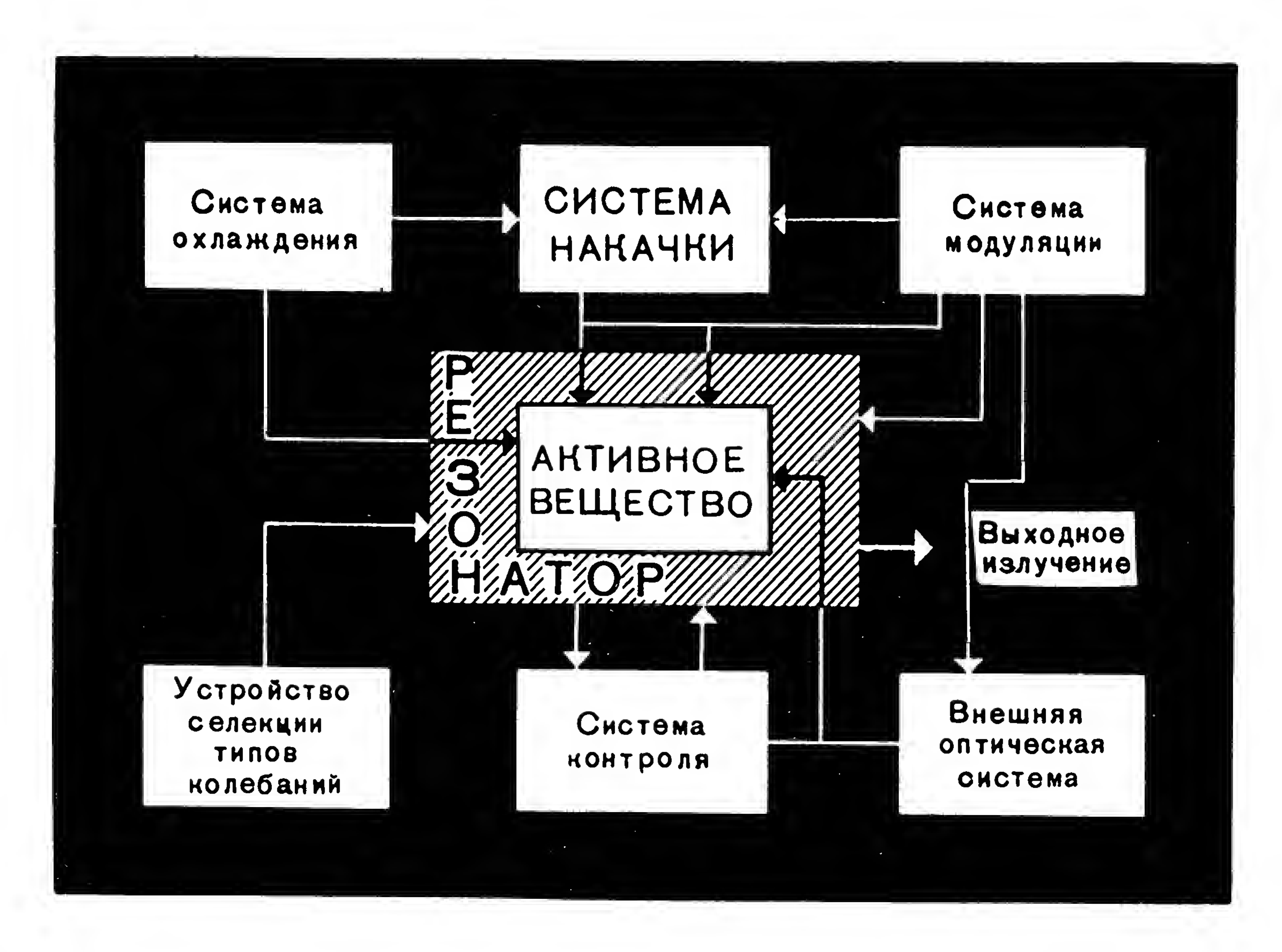


Рис. 4. Структурная схема оптического квантового генератора

В каждом конкретном случае присутствие тех или иных перечисленных элементов или всех сразу не является обязательным.

На рис. 4 приведена функциональная схема ОКГ, где крупным шрифтом надписаны основные элементы лазера, а обычным — системы, которые применяются по мере надобности в зависимости от конкретного назначения прибора.

Лазеры в зависимости от состояния активного вещества подразделяются на твердотельные (в том числе и пластмассовые), газовые, жидкостные, полупроводниковые.

Каждый из перечисленных лазеров может работать как в непрерывном или в импульсном режиме, так и в режиме генерации или усиления.

В дальнейшем при рассмотрении лазерных гироскопов нас будут интересовать твердотельные кристаллические и в основном газовые лазеры, поэтому в целях упрощения изложения рассмотрим только эти виды лазеров.

1.4. Кристаллические лазеры

Первыми лазерами, нашедшими применение в технике, были твердотельные кристаллические лазеры на рубине. Первоначально использовался природный рубин; в настоящее время используются искусственно наращиваемые кристаллы рубина. Рубин — это окись алюминия с примесью окиси хрома. Структура рубина — кристаллическая решетка с внедренными в нее трехзарядными ионами хрома. От количества примесей зависит цвет рубина. При 0,05—0,07% окиси хрома цвет рубина розовый, при 0,5—0,7% — красный. Активное вещество рубинового лазера обычно имеет вид цилиндрического стержня. Отполированные концы стержня покрыты металлом (например, серебром) и образуют зеркала резонатора.

В рубиновом ОКГ кристаллическая решетка является матрицей, а ионы хрома — активатором. Коэффициент полезного действия рубиновых ОКГ не превышает 1%. При генерации на рубине в непрерывном режиме используются кристаллы небольшого размера. При этом, как правило, используется система охлаждения.

Система оптической накачки содержит в общем случае лампу накачки, излучающую лучистый поток, и светооптическую арматуру, концентрирующую поток накачки на активном веществе.

Для оптической накачки обычно используют специальные газоразрядные лампы *1* с ксеноновым наполнением, которые спиралью обвивают стержень активного вещества *2* (рис. 5, *а*). Для значительного повышения эффективности накачки применяют электрические рефлекторы *3*, вдоль фокусных линий которых размещают активное вещество и газоразрядные лампы (рис. 5, *б*). Имеются и другие способы создания светового потока накачки.

При освещении рубинового стержня ярким светом генератора накачки ионы хрома возбуждаются и переходят с основного на высший энергетический уровень. Наибольший эффект получается при облучении рубина ультрафиолетовыми лучами и примыкающими к ним све-

товыми лучами от зеленого до фиолетового цвета. С высшего уровня ионы переходят на основной либо непосредственно (при этом они излучают световую энергию длиной волны в 560 *нм*), либо через промежуточные уровни. Излучение с верхнего промежуточного уровня имеет длину волны 693 *нм*, с низшего — 694,3 *нм*.

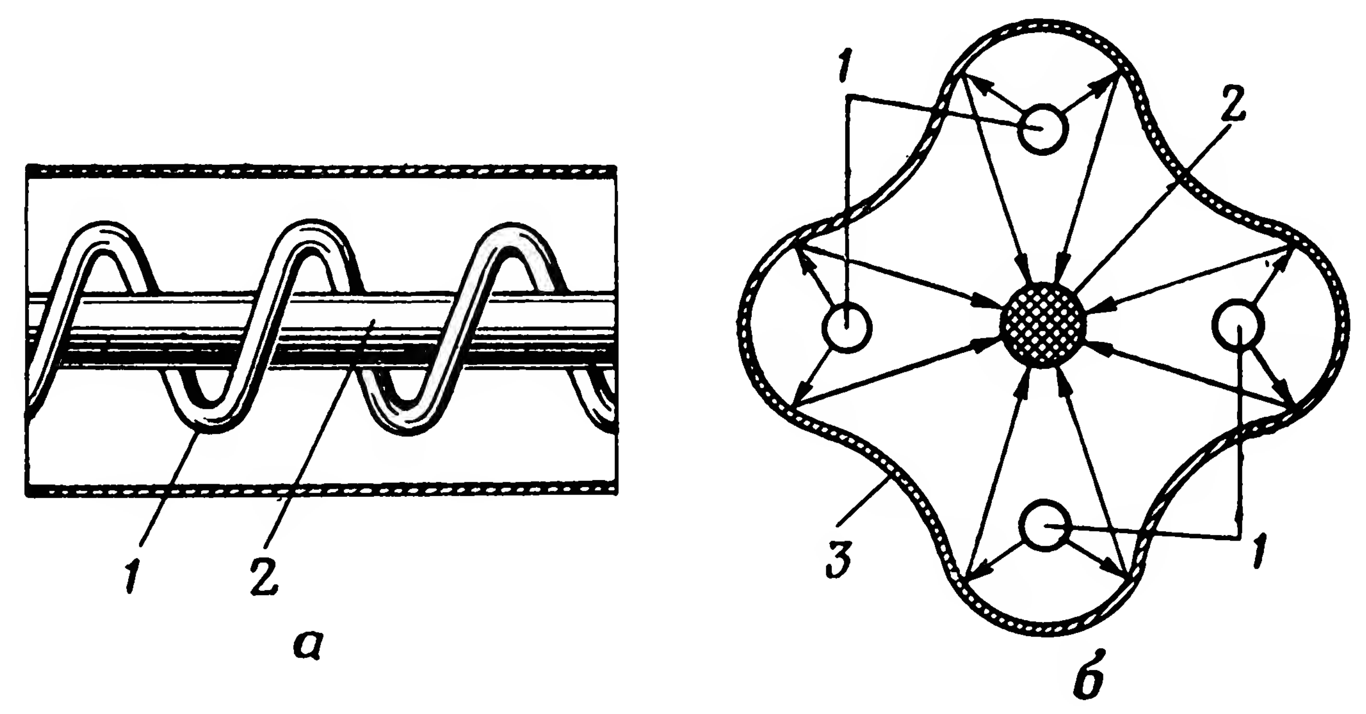


Рис. 5. Схема и типы устройств оптической накачки:
а — вид сбоку; *б* — поперечный разрез

Подобрав размеры резонатора, можно создать условия, когда усиливаться будут колебания с длиной волны, например, 694,3 *нм*. Колебания всех других длин волн некогерентны и быстро затухают.

При этом надо иметь в виду, что вероятность перехода возбуждаемых ионов хрома с высшего уровня на промежуточные больше, чем на основной. Ионы на промежуточный уровень переходят без излучения энергии (эта энергия передается кристаллической решетке рубина).

Кроме того, как показали эксперименты, ионы хрома сохраняют энергию, соответствующую промежуточным уровням, достаточно длительное время (0,003—0,05 *сек*), что значительно больше времени пребывания ионов на высшем (или высших) энергетическом уровне. Поэтому ионов с промежуточными уровнями энергии будет очень много. Если этих ионов недостаточно, то они будут спонтанно переходить на основной уровень. Излучение в этом случае слабое, некогерентное и будет наблюдаться на различных длинах волн.

При достаточной энергии возбуждения количество ионов на промежуточных уровнях превысит критическую

величину и может начаться лавинообразный переход возбужденных ионов хрома с промежуточных уровней на основной.

При выполнении условий генерации лазер начнет излучать поток когерентных световых волн одной длины. При этом интенсивность индуцированного излучения будет значительна и на несколько порядков превысит спонтанное.

1.5. Газовые лазеры

В состав оптических гироскопов, описанных в открытой зарубежной печати, пока входят преимущественно газовые лазеры. Создатели этих гироскопов считают, что газовые лазеры будут наиболее перспективными и в ближайшие годы.

Рассмотрим несколько подробнее основные особенности газовых лазеров, получивших широкое распространение.

Одним из первых газовых лазеров был лазер на смеси инертных газов гелий — неон. Механизм возбуждения лазера на смеси гелий — неон основан на взаимодействии атомов этих газов, имеющих близкие энергетические уровни. Возбуждение атомов происходит как за счет соударений их с электронами, так и за счет столкновения между собой.

Для возбуждения (накачки) газовых ОКГ используются две разновидности тлеющего разряда: разряд постоянного тока и высокочастотный тлеющий разряд. В разряде постоянного тока через плазму протекает ток, не меняющийся во времени. Электроды в этом случае различны по конструкции и располагаются внутри трубки. К электродам подводится постоянное напряжение (обычно 1—2 *кв* на метр разрядного промежутка) от высоковольтного выпрямителя.

При действии высокочастотного тлеющего разряда через плазму течет высокочастотный (10—50 *Мгц*) переменный ток. Газовый лазер при этом накачивается от специального высокочастотного блока, в состав которого может входить мультивибратор на мощных лампах. Под воздействием напряжения накачки в лазере возникает непрерывный дуговой разряд.

К недостаткам лазера на смеси гелий — неон следует отнести необходимость в выравнивании энергетических

уровней этих газов. Конструкция лазера на смеси гелий — неон условно показана на рис. 6.

Разработаны газовые лазеры, действие которых основано на диссоциативной передаче возбуждения. В таких приборах используется смесь инертного газа с каким-либо газом, имеющим двухатомную молекулярную

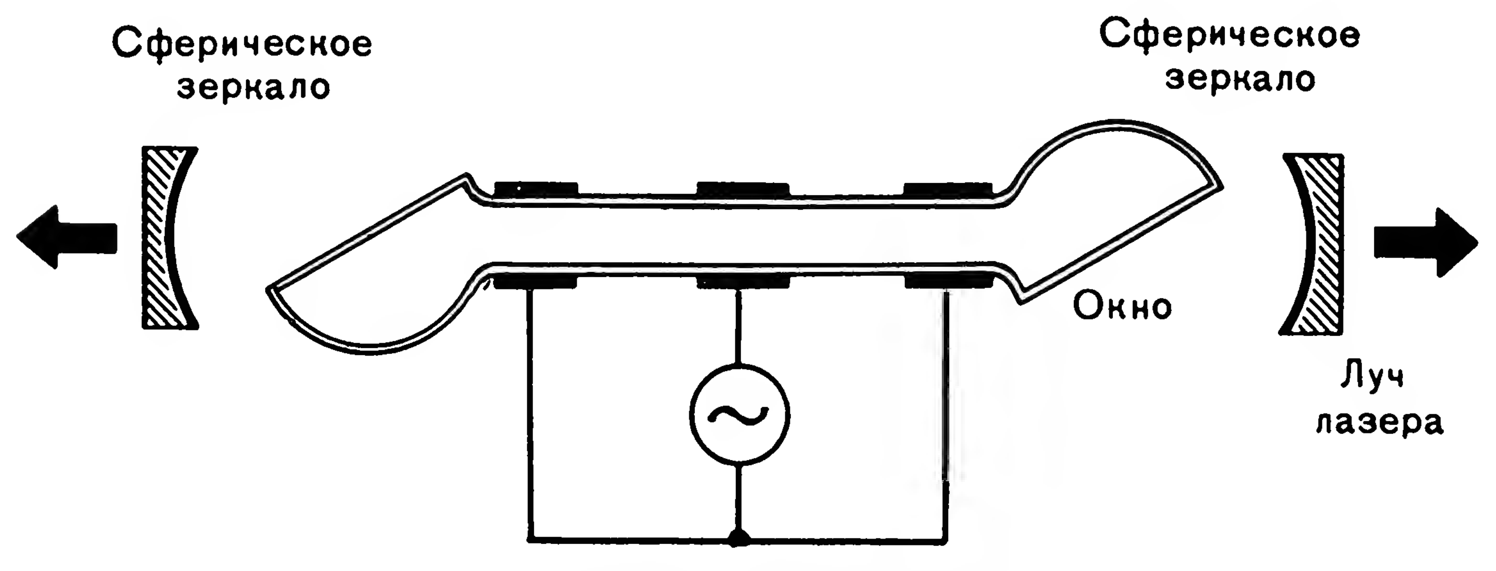


Рис. 6. Схема газового лазера

структуру. Возбужденный атом инертного газа при соударении разбивает молекулу двухатомного газа на два отдельных атома. При этом один из атомов возбуждается до более высокого энергетического уровня, что и приводит к излучению, в то время как другой поглощает оставшуюся энергию. Этим исключается необходимость выравнивания энергетических уровней обоих газов, как в лазере на смеси гелий — неон. В качестве активной среды в рассматриваемых лазерах могут использоваться различные сочетания инертных и двухатомных газов.

Разработаны газовые лазеры, в которых активным веществом является только один инертный газ. В таком лазере вследствие непрерывного дугового разряда (накачки) некоторые атомы ионизируются, появляются свободные электроны, которые возбуждают другие атомы газа, «поднимая» их на более высокий энергетический уровень. Затем электроны с высшего энергетического уровня переходят на более низкий, вызывая когерентное излучение.

Газовые лазеры имеют преимущества перед другими лазерами, и в частности перед твердотельными. Но для гироскопов на лазерах наиболее существенны следующие. Газовые лазеры обладают высокой степенью когерентности. Ширина линии генерации газового ОКГ меньше, чем у твердотельных, и достигает нескольких герц.

Газовая среда обладает более высокой оптической однородностью, поэтому в газовых ОКГ можно получить наименьший угол расходимости светового пучка. В ОКГ на газовых лазерах с плоскими зеркалами без каких-либо дополнительных коллимирующих устройств сравнительно просто получить расходимость луча до 1′.

1.6. Методы приема лазерного излучения

Излученный лазером световой поток в большинстве случаев не может быть непосредственно использован в качестве управляющего сигнала лазерного гироскопа. Поэтому необходимо вначале преобразовать световой сигнал в электрический, а затем и выделить передаваемую информацию. Для этого применяют детекторы излучения ОКГ (их называют также фотодетекторами), которые преобразуют энергию излучения ОКГ в электрический сигнал. Они и применяются в лазерных гироскопах для индикации излучения или выделения разностной частоты двух световых лучей. Фотодетекторы можно разделить на две группы: тепловые и фотоэлектронные (или квантовые и фотонные).

Тепловые фотодетекторы реагируют на повышение температуры чувствительного слоя, вызываемого поглощенным излучением. В результате нагрева чувствительного слоя возникает термо-ЭДС или изменяется сопротивление фотодетектора. Тепловым фотодетекторам свойствен большой недостаток. Они инерционны, при каждом измерении требуют теплового равновесия, вследствие чего полоса пропускания частот у них весьма ограничена, и практически редко используются в оптических гироскопах.

Квантовые фотодетекторы непосредственно преобразуют энергию излучения ОКГ в электрическую путем использования фотоэлектрического эффекта (фотоэффекта). Они реагируют непосредственно на кванты излучения. Однако не все кванты участвуют в формировании полезного сигнала. Часть из них, как в тепловых приемниках, преобразуется в тепловую энергию и не регистрируется. Квантовые фотодетекторы обладают селективностью к излучению с различными длинами волн. Они реагируют также и на изменение интенсивности светового потока, что в свою очередь изменяет электропроводность чувствительного слоя или величину фото-ЭДС.

Так как в квантовых фотодетекторах фототок пропорционален мощности оптического излучения, то все они являются квадратичными детекторами (нелинейными элементами), что позволяет использовать их в качестве частотных и фазовых детекторов.

Существуют два вида проявления фотоэффекта — внешний и внутренний. При внешнем фотоэффекте поглощенная чувствительным слоем энергия светового потока сообщается электронам вещества. Часть из них преодолевает удерживающие их внутри вещества силы и создает поток свободных электронов (фототок).

При внутреннем фотоэффекте происходит внутреннее возбуждение кристаллической решетки полупроводникового материала световым потоком, вследствие чего электроны переводятся из связанных состояний в свободные без выхода наружу. В этом случае энергия фототока недостаточна для образования эмиссии электронов, но достаточна для появления свободного электрона и свободной дырки.

В оптических гироскопах в качестве фотодетекторов с внешним фотоэффектом могут применяться фотоэлементы (ФЭ), электростатические фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и др. Из фотодетекторов с внутренним фотоэффектом могут использоваться полупроводниковые фотодиоды (ФД) и фототриоды.

Прежде чем рассмотреть основные типы фотодетекторов, объясним смысл некоторых основных параметров, по которым можно будет их сравнивать. Такими параметрами можно считать спектральную и интегральную чувствительности, пороговую чувствительность, квантовую эффективность, частотную характеристику.

Спектральная чувствительность S_{λ} — зависимость чувствительности фотодетектора от длины волны монохроматического светового потока. Спектральная чувствительность фотодетектора зависит от его температуры. При охлаждении фотодетектора максимум спектральной характеристики смещается в сторону более длинных волн.

Интегральная чувствительность S представляет собой отношение фототока в цепи фотодетектора к мощности светового потока и выражается в микроамперах на ватт (*мка/вт*) или (для видимой части спектра) в микроамперах на люмен (*мка/лм*). Можно также опре-

делять интегральную чувствительность как отношение напряжения сигнала на выходе фотодетектора к мощности светового потока, вызвавшего этот сигнал. В этом случае (для фотодетекторов с внутренним фотоэффектом) чувствительность выражается в вольтах на ватт (*в/вт*).

Пороговая чувствительность $\Phi_{пор}$ — минимальная величина мощности светового потока, которая может быть зарегистрирована фотодетектором. Величина ее не может превысить уровень шума фотодетектора, при котором отношение сигнал/шум равно единице.

Квантовая эффективность η фотодетектора определяется как средний выход электронов на один падающий фотон. Для детекторов с внешним фотоэффектом этот выход обычно мал и лежит в пределах $1 \cdot 10^{-5}$—0,2, причем последняя цифра достижима лишь на узком частотном участке. Квантовая эффективность фотодиодов близка к единице.

Частотная характеристика выражает зависимость фототока (фото-ЭДС) от частоты модуляции монохроматического излучения и характеризует инерционность фотодетектора. Иногда инерционность фотодетекторов определяется величиной постоянной времени, за которую фототок достигает максимального значения с момента начала облучения фоточувствительной поверхности постоянным световым потоком. Следует отметить, что высокие временные параметры фотодетекторов являются необходимым, но не достаточным условием их широкополосности.

Теперь рассмотрим некоторые основные виды фотодетекторов, применение которых возможно в лазерных гироскопах.

Детекторы с внешним фотоэффектом. Параметры детекторов с внешним фотоэффектом зависят от фотоэмиссионных характеристик материалов, образующих фотокатод. Вторым электродом в таких приборах является анод, на который обычно подается значительное положительное напряжение. Эмиттированные фотоэлектроны под действием этого напряжения устремляются к аноду, создавая ток во внешней цепи. Такое устройство называется фотоэлементом.

Современный фотоэлемент представляет собой обычно стеклянный баллон, из которого откачан воздух. На

большую часть внутренней стенки баллона нанесен методом распыления металл — фотокатод, а роль анода выполняет металлическое кольцо или пластина, находящиеся в центре баллона.

Отметим, что даже при отсутствии облучения фотокатода световым потоком в цепи фотоэлемента течет ток, называемый темновым. Темновой ток обусловлен током термоэмиссии фотокатода и током утечки между электродами. Изменение величины темнового тока приводит к внутренним шумам фотодетектора.

Иногда для повышения интегральной чувствительности фотоэлементов используется усиление первичного фототока с помощью ионизации инертного газа, которым наполняется баллон фотоэлемента (газонаполненные фотоэлементы). Недостатком газонаполненных фотоэлементов является их большая инерционность.

Сравнительно небольшая чувствительность вакуумных и большая инерционность газонаполненных фотоэлементов ограничивают возможности их применения. Значительно чаще используются электростатические фотоэлектронные умножители, в которых первичный фототок усиливается за счет явления вторичной электронной эмиссии.

Электрон, эмиттированный фотокатодом, ускоряется напряжением U_1 и направляется на электрод *Д1*, называемый динодом. С его поверхности выбивается несколько новых электронов, которые ускоряются напряжением U_2 и направляются на последующий динод *Д2*; так будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнут последний каскад умножения, с которого электроны поступают на анод, находящийся под положительным потенциалом.

Усиление тока в ФЭУ зависит от количества каскадов умножения (динодов) и коэффициента вторичной эмиссии δ каждого каскада, определяемого числом вторичных электронов, приходящихся на один первичный. Этот коэффициент зависит от напряжения между динодами, их размера, расположения и состава эмиссионного материала. Обычно $\delta=3$—10, число каскадов $n=9$—14. Коэффициент усиления тока ФЭУ определяется соотношением $K=\delta^n$ и превышает обычно величину 10^6, что соответствует усилению по мощности на 120 *дб*. Временное разрешение ФЭУ может быть меньше 1 *нсек*; верхний

предел частотной характеристики составляет обычно 100—200 *Мгц*, достигая в лучших образцах 300 *Мгц*.

Детекторы с внутренним фотоэффектом. Фотодиоды и фототриоды. Принцип работы фотодиода состоит в следующем. Когда фотодиод не освещен, а на *p—n*-переход подано обратное напряжение, то через переход будет течь небольшой ток, обусловленный неосновными носителями тока — электронами в *p*-области и дырками в *n*-области полупроводника. При освещении фотодиода на границе *n*-области возникают пары электрон — дырка. Дырки, являясь неосновными носителями в этой области, диффундируют вглубь и, подойдя к переходу, увлекаются в *p*-область. Для этого необходимо, чтобы толщина *n*-слоя была меньше диффузионной длины и обеспечивалось бы попадание дырок в *p*-область до их рекомбинации. Рост тока неосновных носителей вызывает добавочное падение напряжения на нагрузочном сопротивлении. Добавочное падение напряжения и является полезным сигналом. Фотодиоды могут работать как в вентильном режиме (без внешнего источника питания), так и в фотодиодном, когда в запирающем направлении приложено напряжение питания (от 8 до 100 *в*).

В фототриодах при облучении их световым потоком фототок не только индуцируется, но и усиливается. Поэтому интегральная чувствительность фототриодов больше, чем у фотодиодов, и достигает нескольких ампер на люмен.

Фотодиоды и фототриоды могут быть точечными и плоскостными и изготавливаются из германия, кремния, селенида и арсенида индия.

Глава II

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Выше было сказано, что лазерные гироскопы обладают рядом преимуществ по сравнению с электромеханическими. Эти преимущества открывают широкую перспективу в практическом использовании гироскопов на лазерах. Так, для конструкторов систем управления всегда весьма важно, каким способом и в каком виде снимаются с гироскопов выходные данные.

Гироскоп на лазере позволяет получить на его выходе очень удобные для управления сигналы, например, в виде последовательности электрических импульсов, полярность которых определяется направлением поворота гироскопа. Число одиночных импульсов пропорционально малым фиксированным приращениям угла поворота (например, одной секунде дуги). Полный угол поворота гироскопа находится по общему количеству импульсов.

Еще более важным для конструкторов является точность работы прибора. Точность работы гироскопов на лазерах чрезвычайно высока. Так как по своему назначению они должны регистрировать скорость вращения меньше 0,1 *град/ч*, то это приводит к необходимости измерять разность оптических траекторий с точностью до 10^{-5} *нм* и частотные изменения около 0,1 *гц* (при рабочей частоте 10^{14}—10^{15} *гц*).

Самая простая конструкция такого прибора представляет собой обычное устройство с тремя зеркалами-отражателями, размещенными по углам контура так, что образуется замкнутая траектория (кольцо) для светового луча.

Лазерный луч (рис. 7) создается двумя квантовыми генераторами (ОКГ), один из которых посылает излуче-

ние по часовой стрелке, а другой — против часовой стрелки.

Упоминание о двух ОКГ приводится с целью упрощения рассуждений. На практике в лазерном гироскопе может быть установлен один оптический квантовый генератор, имеющий два и более активных элементов,

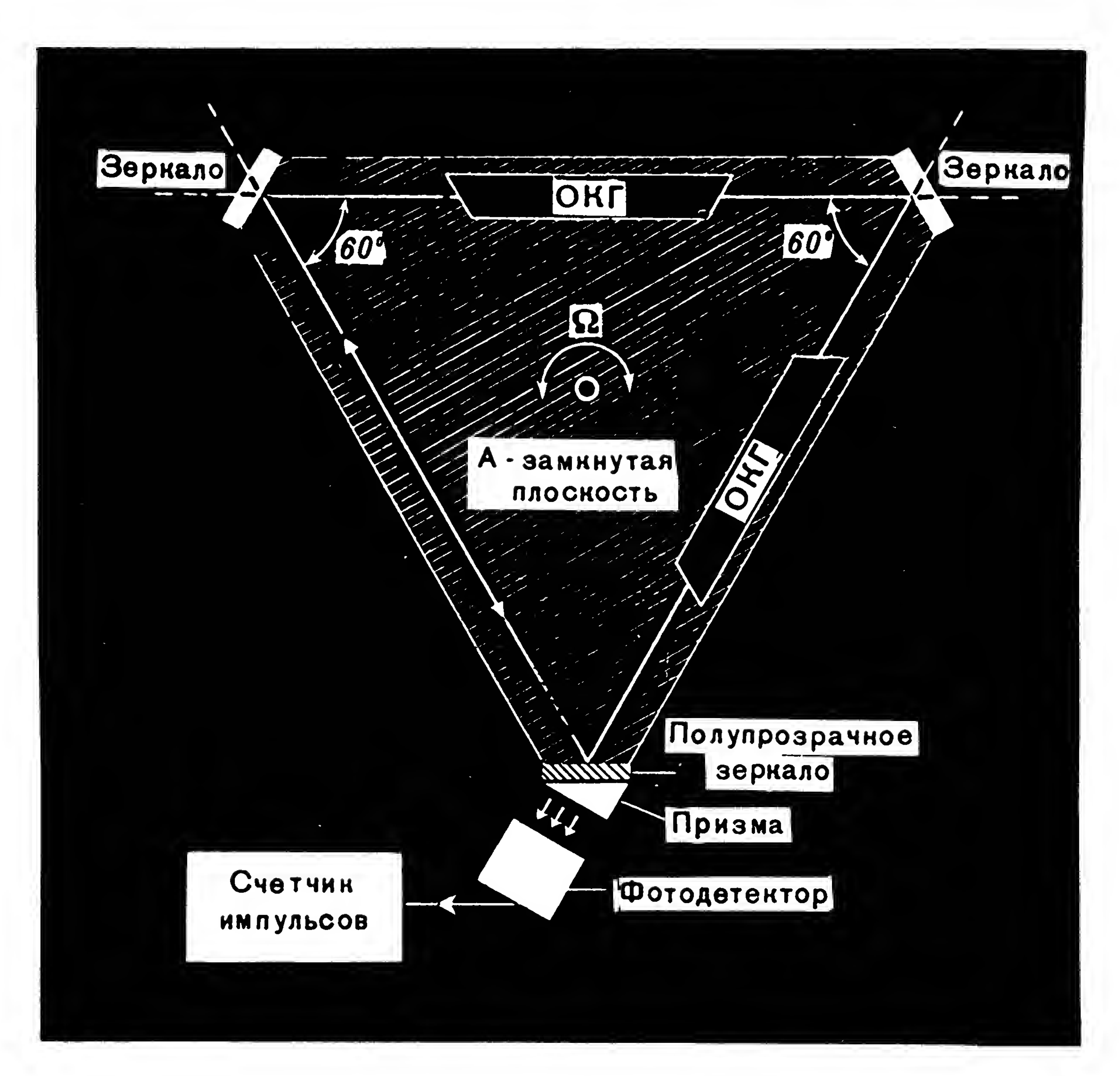


Рис. 7. Принципиальная схема лазерного гироскопа

формирующих лучи, движущиеся в противоположных направлениях.

Отражаясь от зеркал, проходя от зеркала к зеркалу и, наконец, через полупрозрачное зеркало и призму, световое излучение ослабевает. Для поддержания световых волн в системе на уровне, необходимом для нормальной работы, нужно, чтобы коэффициент усиления световых лучей вдоль всего пути был бы не менее 1. Необходимо также, чтобы на длине пути лазерных лучей укладывалось бы целое число длин волн, генерируемых

лазерами, т. е. сдвиг фаз световых колебаний в полости резонатора должен равняться нулю. Для выполнения последнего условия частота колебаний лазера должна быть такой, чтобы усиливающая среда дала коэффициент усиления, достаточный для компенсации потерь в отражающих и других элементах оптического контура лазера. Эта частота при работе ОКГ устанавливается автоматически.

При повороте кольцевого резонатора в инерциальном пространстве оптические пути, проходимые лучами, движущимися по и против часовой стрелки, оказываются неодинаковыми. Разность между оптическими путями приводит в этом случае к возникновению разности частот генерируемых колебаний (эффект Саньяка), которая и определяет скорость вращения резонатора.

2.1. Основы теории лазерных гироскопов

Из общей теории относительности следует, что время для двух наблюдателей, перемещающихся в противоположных направлениях по замкнутому контуру в инерциальном пространстве, оказывается неодинаковым. Для наблюдателя, перемещающегося в направлении вращения, время течет быстрее, а для наблюдателя, движущегося против направления вращения, медленнее.

В соответствии с этим и теория лазерного гироскопа исходит из того, что для наблюдателя (фотона), движущегося в направлении вращения и против направления вращения гироскопа, длина пути по контуру будет различной.

Разность во времени Δt для обоих наблюдателей за один оборот зависит от скорости Ω вращения контура в пространстве и площади контура A. При этом

$$\Delta t = \frac{\Omega}{c^2} 2A + \frac{\Omega}{c^2} 2A = \frac{4A\Omega}{c^2},$$

где c — скорость света;
A — площадь проекции контура на плоскость вращения;
Ω — угловая скорость вращения (поворота) гироскопа.

Для двух пучков фотонов, движущихся в лазерном гироскопе в противоположных направлениях, разность

времени Δt пропорциональна разности их оптических путей ΔL, так как

$$\Delta L = c\Delta t + \frac{4A\Omega}{c},$$

где $\Delta L = L_1 - L_2$.

Из формулы видно, что для получения достаточной разности оптических путей скорость вращения или площадь контура должна быть достаточно большой.

На практике измеряют не разницу оптических путей движущегося контура гироскопа, а разность частот колебаний Δf двух движущихся в противоположные стороны световых лучей.

Чаще всего это измерение осуществляется с помощью фотодетектора, на выходе которого получается сигнал, соответствующий положительному или отрицательному сдвигу фаз, определяемому направлением вращения гироскопа.

Частоты колебаний f_1 и f_2 вращающегося гироскопа определяются соотношениями:

$$f_1 = \frac{cq}{2L_1}; \; f_2 = \frac{cq}{2L_2},$$

где q — целое число волн, укладывающихся на расстоянии между зеркалами;

$L_1 = p + \frac{2A}{c}\Omega$ — длина оптического пути 1-го луча;

$L_2 = p - \frac{2A}{c}\Omega$ — длина оптического пути 2-го луча.

Частота колебаний в покоящемся гироскопе $f_0 = \frac{cq}{2p}$.

С учетом последних зависимостей соотношение между разностью частот и скоростью вращения Ω (при $\Omega =$ const) будет иметь вид

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{cq}{2L_2} - \frac{cq}{2L_1} = \frac{cq}{2} \cdot \frac{L_1 - L_2}{L_1 L_2}.$$

Но так как $L_1 - L_2 = \Delta L = \frac{4A\Omega}{c}$, то

$$\Delta f = \frac{cq}{2} \cdot \frac{\frac{4A\Omega}{c}}{\left(p + \frac{2A}{c}\Omega\right)\left(p - \frac{2A}{c}\Omega\right)} = \frac{cq}{2} \cdot \frac{\frac{4A\Omega}{c}}{p^2 - \frac{4A^2}{c^2}\Omega^2}.$$

Так как обычно периметр контура $p \gg \frac{4A^2}{c^2}\Omega^2$, то, упрощая последнюю формулу, получим

$$\Delta f = \frac{cq}{2} \cdot \frac{4A\Omega}{c} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{cq}{2p} \cdot \frac{4A\Omega}{cp} = \frac{f_0}{c} \cdot \frac{4A}{p}\Omega.$$

Обозначив $\frac{f_0}{c} \cdot \frac{4A}{p} = B = \text{const}$, получим

$$\Delta f = B\Omega.$$

Коэффициент B, называемый лазерной постоянной, характеризует чувствительность лазерного гироскопа.

Чем больше B, тем выше чувствительность гироскопов на лазерах. Для современных лазерных гироскопов величина B равна 10^5—10^6 и более.

2.2. Некоторые экспериментальные данные, полученные при работе с лазерными гироскопами

В американской литературе приводятся некоторые экспериментальные данные по кольцевым лазерам. При определении скорости вращения Земли контур площадью 20 *м*^{2} поворачивался со скоростью ее вращения, при этом была получена разность оптических путей, равная 10 *нм*. Эти данные практически точно совпадают с расчетными.

В экспериментальном гироскопе применялся газовый ОКГ, работавший на частоте около $3 \cdot 10^{14}$ *гц*. Частота генератора регулировалась в пределах, обеспечивающих отсутствие фазового сдвига между генерируемыми колебаниями и колебаниями, прошедшими по замкнутому контуру во всем диапазоне изменения скорости вращения этого контура.

Усиление светового луча в ОКГ, равное 1,01—1,05, создавалось с помощью электрического разряда в газе, состоящем из десяти частей гелия и одной части неона. Газовая смесь находилась под давлением от 1 до 10 *мм рт. ст.*

В иностранной печати [5] были опубликованы данные об испытании одного из лазерных гироскопов. Испытания проводились с целью определения точностных характеристик кольцевого лазерного датчика угловых скоростей и зависимости этих характеристик от магнитного и гравитационного полей.

Блок чувствительных элементов состоял из 3 кольцевых (треугольных) гироскопов с длиной стороны 12,7 *см*.

Блок имел вид цилиндра диаметром 25,4 *см* и высотой 17,8 *см*. Для оценки точности лазерного датчика измерялись статические и динамические ошибки. Стабильность параметров гироскопа проверялась на прецезионном поворотном столе. Измерения статической ошибки показали, что дрейф гироскопа в течение первого часа испытаний был равен 0,4 *град/ч*, а в течение последующих четырех часов значительно уменьшился. Для измерения динамических ошибок гироскоп вращали с постоянными скоростями. В диапазоне больших и малых угловых скоростей динамическая ошибка составила 0,01%.

Для оценки влияния гравитационного поля на точность гироскопа его устанавливали на прецезионной оптической головке. Уходы гироскопа определяли при повороте его вокруг оси чувствительности. Испытания проводили при различных положениях гироскопа в гравитационном поле Земли. Были проведены также аналогичные испытания для оценки влияния магнитного поля. Гироскоп в этом случае помещали на немагнитном основании внутри катушки Гельмгольца.

Испытания показали, что гравитационное поле Земли и перегрузки практически не влияют на точность лазерного гироскопа, а величине магнитного поля Земли соответствует ошибка в измерении угловой скорости лазерным гироскопом 0,03 *град/ч*.

2.3. Схема считывания данных с лазерного гироскопа

Для считывания угловой скорости поворота лазерного гироскопа может быть применено несколько различных способов. Например, угловая скорость может быть определена путем измерения разности частот двух лучей.

При малых угловых скоростях поворота гироскопа более точным способом является способ определения фазового сдвига поступающих сигналов.

Одна из возможных схем определения отклонения фазы световых колебаний для считывания данных с лазерного гироскопа поясняется рис. 8, где изображены диэлектрическое зеркало — одно из отражающих зеркал контура и расщепляющая призма. Зеркало не полностью отражает падающие на него лучи. Некоторая их часть

(примерно 1%) проходит через него и, разделяясь, преломляется призмой. Лучи, распространяющиеся в контуре в направлении вращения часовой стрелки (1-й луч) и против ее вращения (2-й луч), проходя через призму, образуют на экране *АА* интерференционные полосы. Это возможно вследствие того, что угол при вершине призмы не точно равен 90°, а угол Θ, образованный после преломления 1-го и 2-го лучей, не равен 0.

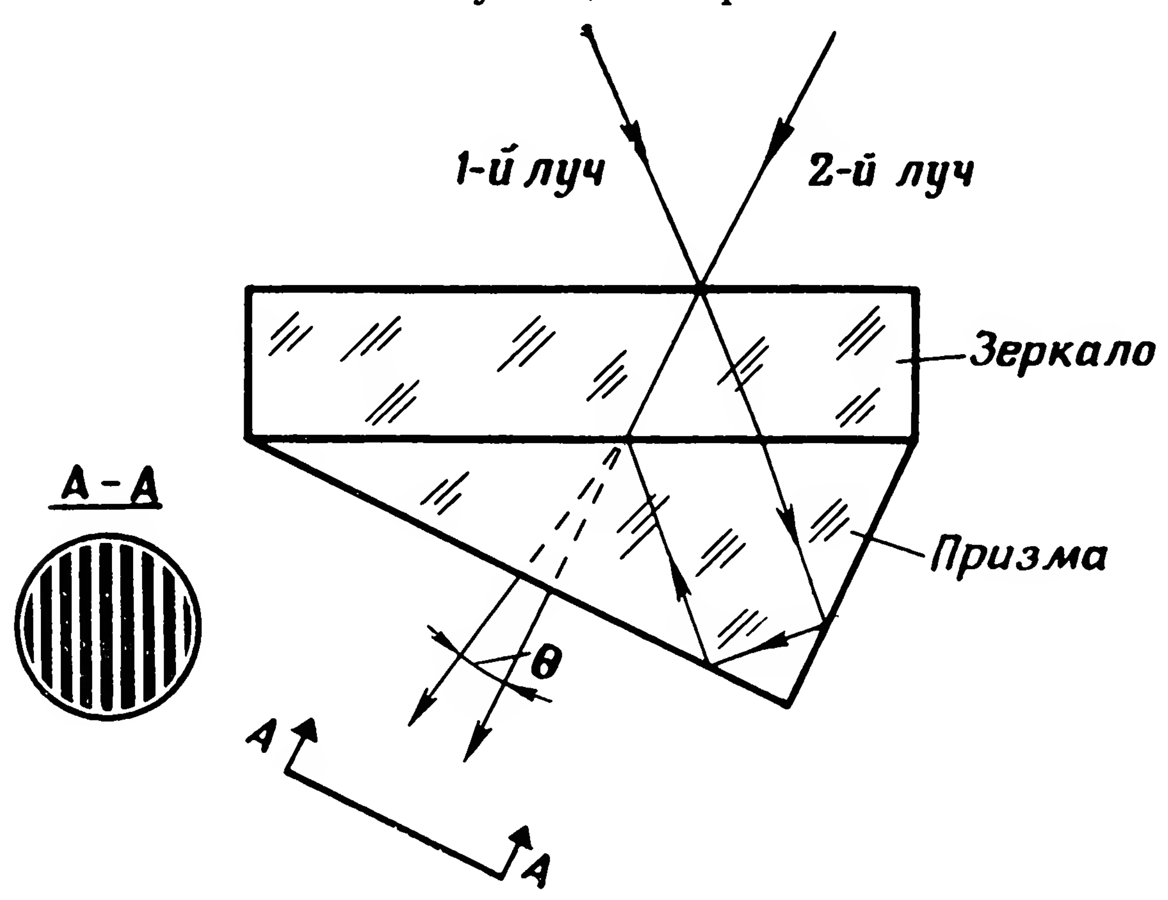


Рис. 8. Схема расщепления луча

Если разность фаз между световыми колебаниями этих лучей остается постоянной, то полосы будут неподвижными.

При изменении разности фаз интерференционные полосы перемещаются влево или вправо в зависимости от направления вращения контура. Перемещение на один шаг между полосами соответствует изменению фаз на 2π радиан.

Направление и скорость изменения фазы определяются с помощью двух фотоэлектрических детекторов, смещенных относительно друг друга на 1/4 шага между полосами. Таким образом выходные сигналы детекторов оказываются сдвинутыми относительно друг друга на 90°. Это позволяет, подключив детекторы к осциллографу, увидеть выходной сигнал гироскопа на его экране в виде фигуры Лиссажу.

При повороте гироскопа по часовой стрелке интерференционный рисунок смещается, что заставляет изо-

бражение на экране осциллографа перемещаться по кольцу в определенном направлении.

При изменении направления поворота гироскопа изменится и направление движения кольца на экране.

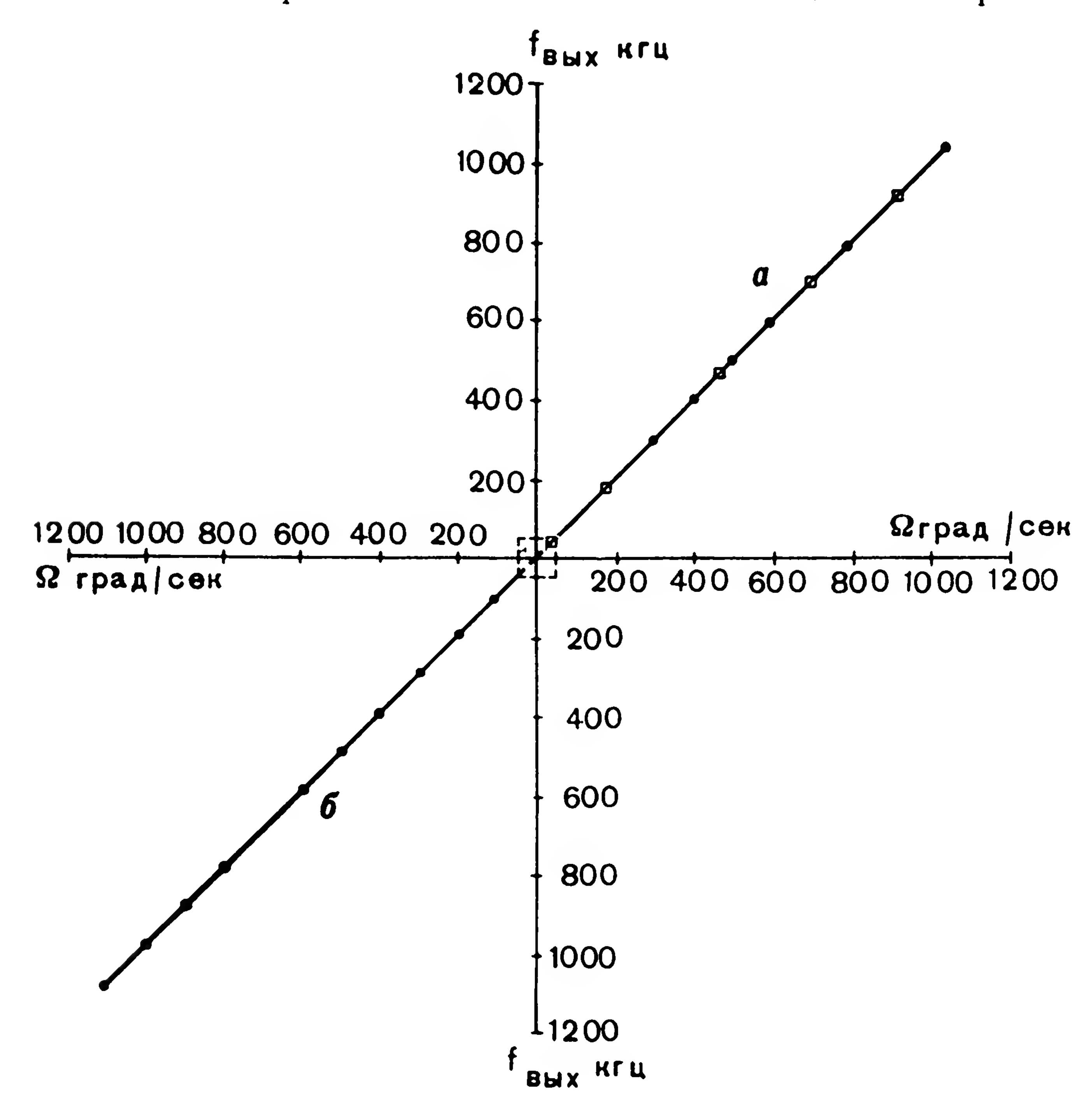


Рис. 9. График зависимости частоты биений выходного сигнала от скорости вращения высокоскоростного гироскопа

Выходные сигналы детекторов подсчитываются с помощью двоичных счетчиков, причем каждый отсчет соответствует изменению фазы на 2π радиан. При скорости вращения гироскопа, равной 1 *град/ч*, можно получить изменение фазы со скоростью 2π радиан за секунду.

Зависимость частоты выходных импульсов от скорости вращения лазерного гироскопа приведена на рис. 9, где *а* — вращение по часовой стрелке; *б* — вращение против часовой стрелки. Пунктиром обведена зона нечувствительности.

Рассмотрим теперь один из первых макетов лазерного гироскопа, созданного фирмой Sperry Rand, кото-

рый предназначался для исследований возможности применения этих гироскопов в навигационных приборах.

В гироскопе (рис. 10) использовались четыре газовых (He — Ne) лазера непрерывного излучения, которые располагались по сторонам квадрата, образуя замкнутый резонатор (кольцо). В отличие от обычного лазера,

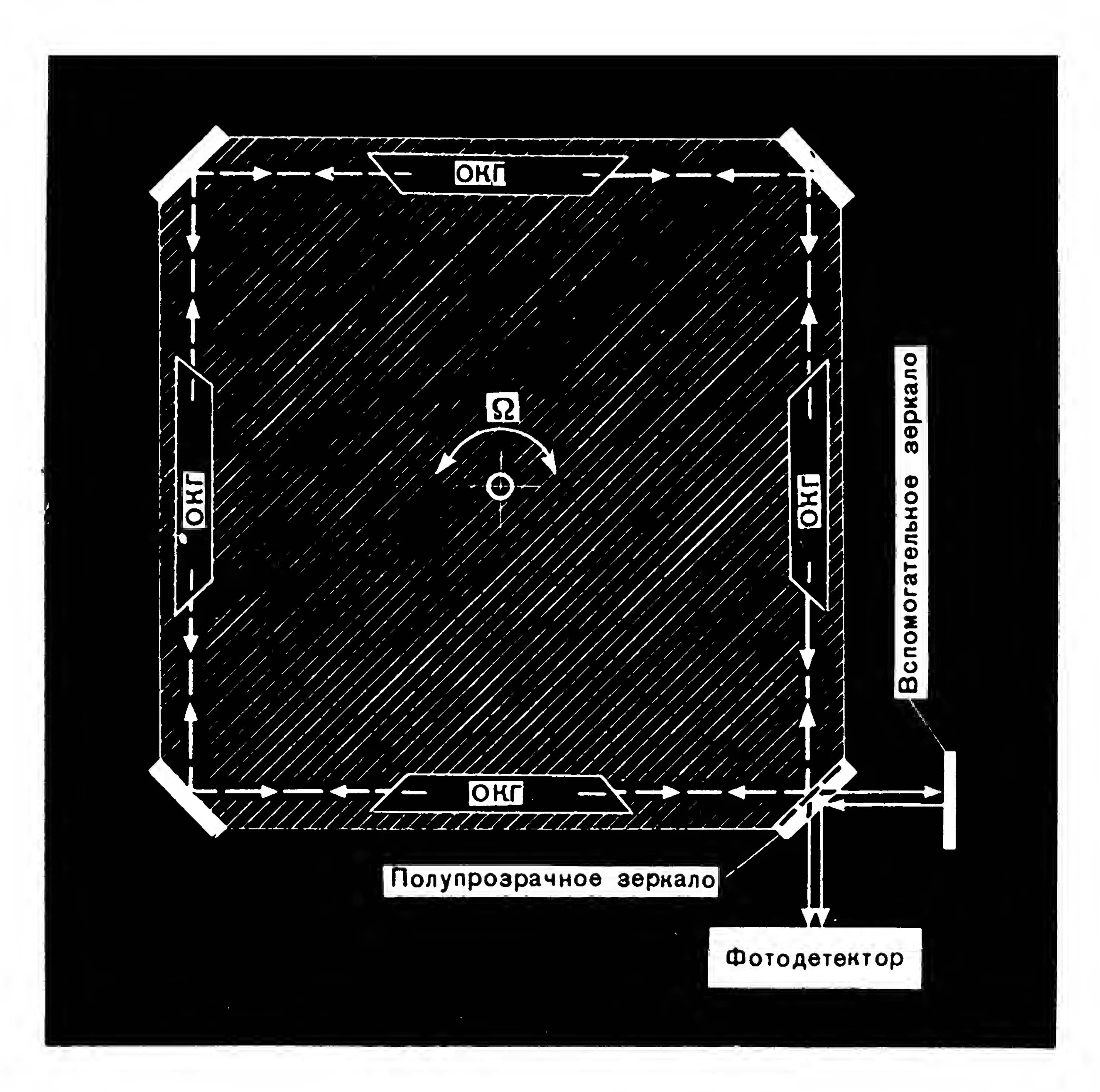


Рис. 10. Схематическое изображение макета оптического гироскопа

в котором только один конец трубки является излучающим, в данном гироскопе все четыре лазера излучали в двух направлениях. В каждом из четырех углов лазерного кольца устанавливалось зеркало, расположенное под углом 45° к оси лазеров, так что свет, излучаемый одним лазером, отражался к соседнему. Таким образом, энергия, излучаемая каждым лазером, циркулировала по кольцу. Но так как каждый лазер излучает энергию с обоих концов трубки, в гироскопе создавалось два

световых луча, движущихся по кольцу в противоположных направлениях. Как уже указывалось, при повороте гироскопа вокруг оси возникает разность частот между лучами.

Образовавшаяся разность частот измерялась оптическим методом по уже рассмотренной схеме расщепления луча. Для этого одно угловое зеркало покрывалось таким тонким слоем серебра, что необходимое количество

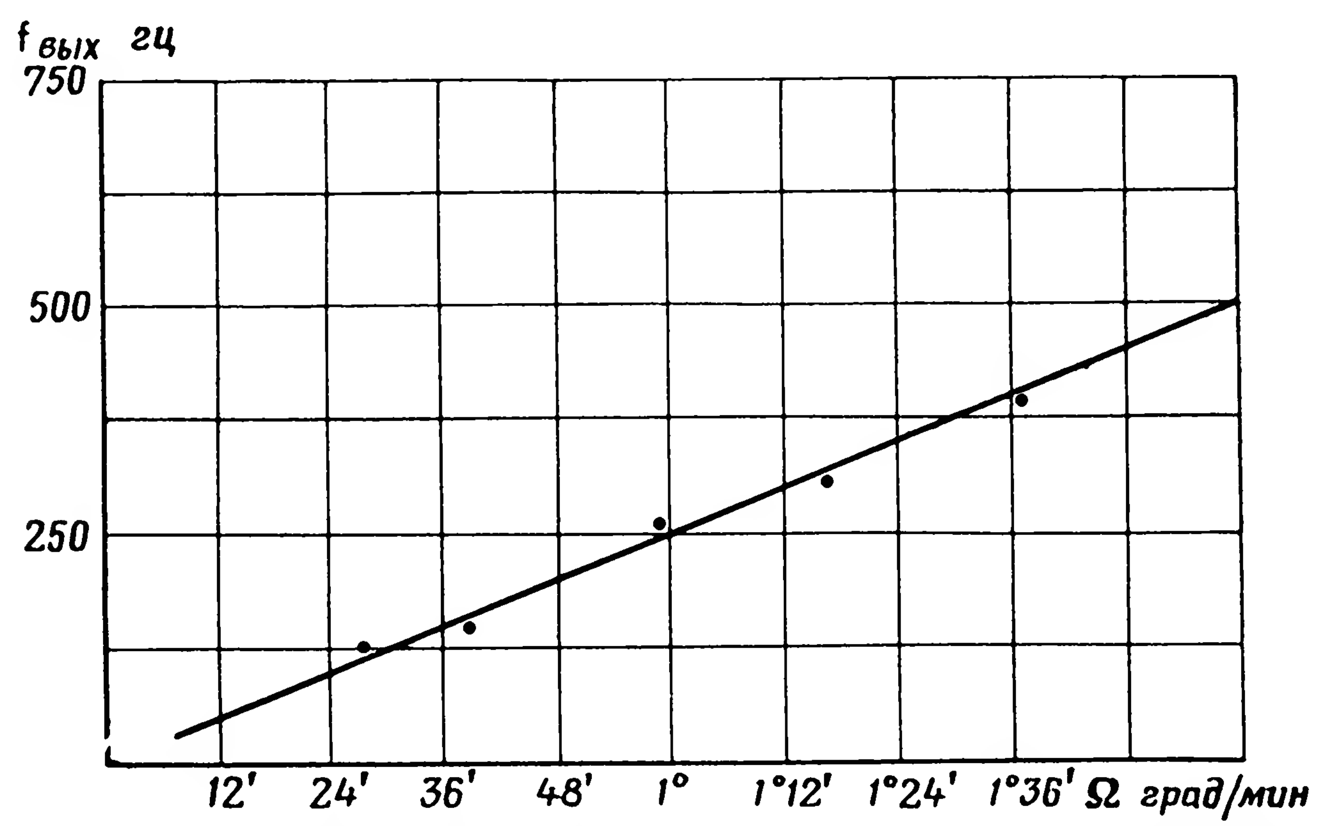


Рис. 11. График зависимости частоты биения выходного сигнала от скорости вращения платформы гироскопа, измеряющего малые угловые скорости

энергии двух встречных световых лучей проходило сквозь зеркало, а остальная часть отражалась и продолжала циркулировать по кольцу.

Вспомогательное плоское зеркало предназначалось для отражения обратно к угловому зеркалу одного из лучей. Поэтому оба луча выходили из лазерного кольца в одном и том же направлении и падали на фотодетектор. В результате смешения этих лучей возникали биения на частоте, прямо пропорциональной угловой скорости вращения лазерного кольца, оптической длине каждого плеча рамки и обратно пропорциональной длине волны излучения лазеров.

Оптическая длина плеча составляла примерно 1 *м*, а длина волны излучения лазеров на смеси гелий — неон была равна 1,153 *мкм*. С выхода фотодетектора снимался сигнал разностной частоты 250 *гц* на каждый градус углового вращения в минуту (рис. 11). Во время испы-

таний прибора при скорости вращения 2 *град/мин* (минимальная скорость поворота) была получена частота выходного сигнала 500 *гц*, а при 600 *град/мин* (максимальная скорость поворота) — 150 *кгц*.

Рассмотрим теперь другой тип лазерного гироскопа, который также нашел практическое применение.

2.4. Монолитный лазерный гироскоп

Хрупкие деформирующиеся трубки газовых лазеров и закрепленные отдельно зеркала в первых экспериментальных приборах являлись причиной нестабильной работы прибора. Для обеспечения жесткости конструкции требовалась достаточно массивная рама.

Лазерный гироскоп фирмы «Ханиуэлл» для обеспечения компактности и прочности располагался в блоке, выполненном из куска высококачественного кварца. Отверстия и резонаторы в блоке для светопроводов, анодов, катодов и заполняемых каналов получали путем механической обработки. Зеркала (их в приборе три, рис. 12) наносились на поверхности в углах блока методом молекулярной адгезии, чтобы обеспечить достаточную жесткость системы. К выходному зеркалу присоединялась светорасщепительная разделительная призма, пройдя которую лучи попадали на фотодетектор. Перед молекулярной адгезией контактирующие поверхности кварца и зеркал делают предельно плоскими и тщательно полируют. Внутренние полости заполняют смесью гелий — неон при давлении около 5 *мм рт. ст.*

Для возникновения лазерного эффекта между анодом и катодом подается напряжение накачки около 1 *кв*. Допуски на размеры блока должны быть достаточно малыми, чтобы гарантировать возникновение лазерного эффекта. Специалисты фирмы считают, что они успешно преодолели ряд трудностей по механической обработке блока и достигли такого уровня технологии, что после некоторой доработки приборы смогут изготовляться промышленными предприятиями. Сравнительная простота конструкции кварцевого блока позволяет надеяться, что лазерные гироскопы будут дешевле обычных. При этом утверждается, что этот лазерный гироскоп обладает рядом существенных преимуществ перед другими типами оптических гироскопов, например:

— имеет повышенную жесткость, так как в нем не

используются хрупкие разрядные трубки газового лазера;

— достаточно просто регулируется, так как при меньшем числе элементов облегчается юстировка, уменьшаются потери света на рассеивание; кроме того, при

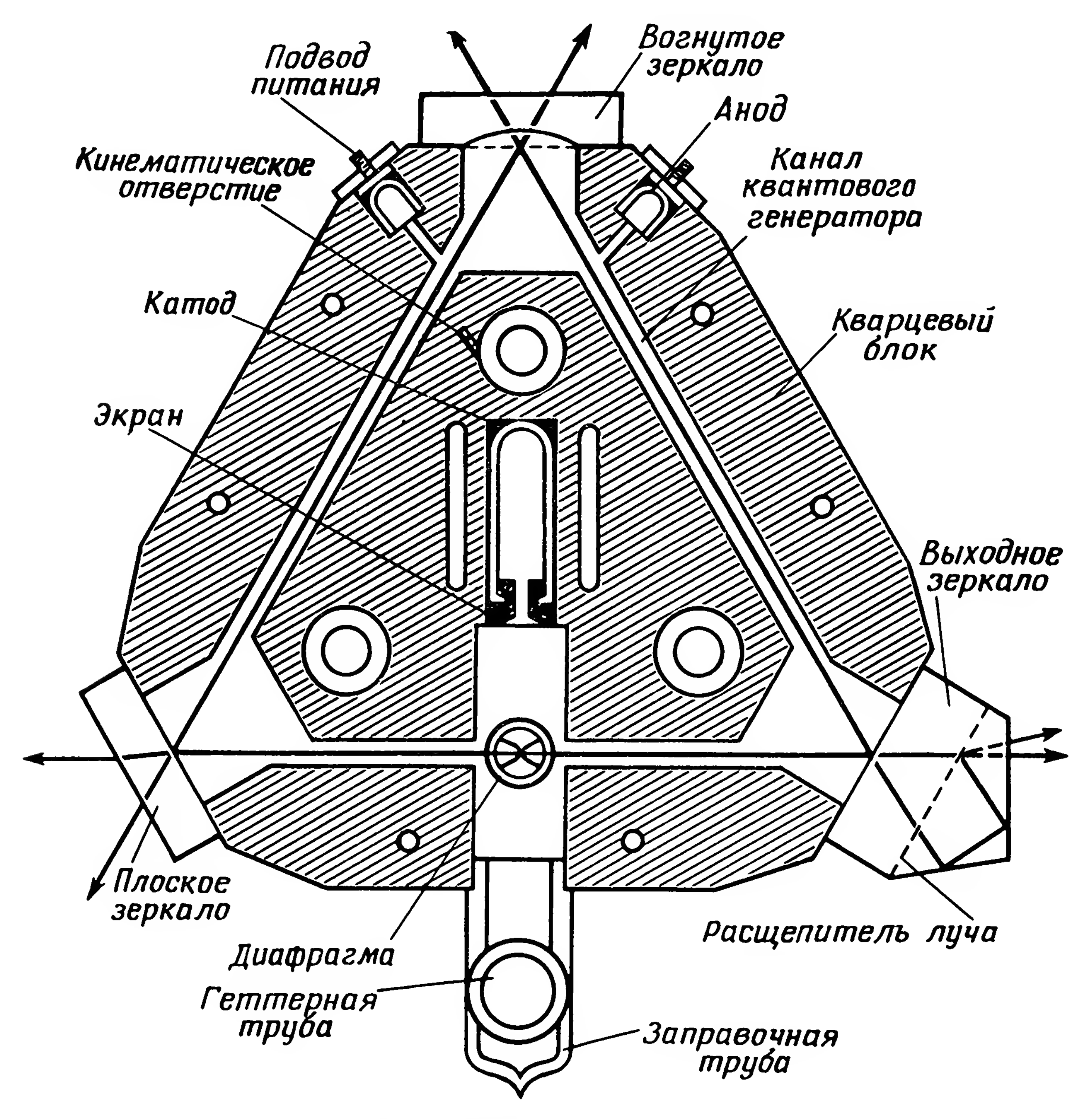


Рис. 12. Конструкция лазерного гироскопа

нечетном числе зеркал происходит их самоюстирование в горизонтальной плоскости;

— имеет небольшие размеры, так как не нужен громоздкий световод.

Первый лазерный гироскоп с кольцевым резонатором имел длину световода 390 *см* и площадь 9000 *см*^{2}.

Общая длина световода кварцевого блока не более 32 *см*. Блок занимает площадь всего лишь 90 *см*^{2}. Вес гироскопа около 2 *кг*, и он может измерять скорости вращения порядка 0,1 *град/сек*.

Рассматриваемый гироскоп является одноосным, т. е. может измерять угловые отклонения только в одной плоскости. Поэтому вполне естественно возникла идея создания трехосного сферического лазерного гироскопа.

Фирма «Ханиуэлл» создала такой гироскоп. Он состоит из трех одноосных гироскопов, каждый из которых измеряет скорость вращения около одной ортогональной оси. Внешний диаметр гироскопа около 13 *см*. По данным фирмы, прибор способен измерять малые скорости вращения (меньше 0,1 *град/сек*).

Гироскоп может крепиться на карданном подвесе системы слежения и измерять угловую скорость вращения следящих устройств, например ракеты. Предполагается использовать этот прибор для космической навигации.

Теперь кратко рассмотрим, какие принципиальные трудности возникают перед разработчиками лазерных гироскопов, стремящимися получить от гироскопов максимальные точности измерений при минимальных габаритах.

2.5. Источники ошибок и ограничения, влияющие на точность измерений и габариты лазерных гироскопов

Как показано в иностранных работах, основными источниками ошибок, ограничивающими точность измерения угловой скорости поворота лазерных гироскопов, являются:

— многомодовый характер излучения;
— флуктуации фазы и частоты светового излучения;
— захватывание частоты;
— «уход нуля» гироскопа.

Рассмотрим характер этих дестабилизирующих факторов более подробно.

Многомодовый характер излучения газового лазера. В кольцевом лазере могут возбуждаться несколько отдельных колебаний (мод) с разными частотами. При вращении гироскопа с угловой скоростью Ω многомодовый режим генерации приводит к расщеплению каждой моды на две частоты. При этом разности частот биений соседних мод будут несколько отличаться друг от друга, что затрудняет четкое выделение сигнала разностной частоты и оценку угловой скорости вращения. Поэтому в реальных конструкциях гироскопов на лазерах стремятся обеспечить режим генерации, близкий к одномодовому. Одним из способов подавления нежелательных видов

колебаний является регулирование усиления активной среды лазера таким образом, чтобы на всех модах, кроме одной, усиление не компенсировало активных потерь резонатора. В этом случае генерация возникает только на одной частоте.

Флуктуации фазы и частоты излучения. Стабильность фазы и частоты лазерного генератора в конечном счете ограничивается спонтанной эмиссией фотонов активного вещества.

Фаза основного излучения может измениться на величину, пропорциональную общему количеству спонтанно излученных фотонов. Изменения в этом случае были бы весьма существенными. Но так как фазы излучения фотонов, как правило, не совпадают, то флуктуации величины и фазы излучения невелики. Однако этот фазовый сдвиг носит случайный характер. При этом разброс частоты основного излучения для газовых лазеров лежит в пределах от 0,001 до 1 *гц*. Практически точность измерения угловой скорости ограничивается минимальным значением фазы, которую можно измерить фотодетектором. Однако следует ожидать, что с усовершенствованием технологии изготовления лазерных гироскопов и их элементов точность измерения угловых положений приблизится к пределам, определяемым флуктуациями фазы и частоты генератора.

Захватывание частоты. При высоких скоростях вращения (поворота) гироскопа разность частот оптических генераторов пропорциональна скорости вращения. Однако при уменьшении этой скорости разность частот приближается к нулю быстрее, чем скорость углового вращения гироскопа.

В результате на малых скоростях поворота ошибки измерения угловой скорости недопустимо увеличиваются, а на самых малых скоростях гироскоп вообще уже не регистрирует начального поворота (участок *АА*, рис. 14). Происходит так называемый захват частот колебаний одного генератора другим вследствие взаимного влияния двух генераторов.

Захват лучей, распространяющихся в противоположных направлениях, связан с их обратным рассеянием, поэтому уменьшение зоны захвата сводится прежде всего к уменьшению этого рассеяния. Для этого необходимо:

— довести до минимума рассеяние на зеркалах гироскопа;

— вакуумировать насколько возможно тракт, по которому распространяются лучи;

— свести к минимуму влияние плазмы активного вещества оптического контура.

Кроме того, зона захвата уменьшается при увеличении периметра, охватываемого лучами, и диаметра их потока, а также при увеличении длины волны излучения.

Выбор длины волны генерируемых колебаний ограничивается значениями, при которых возможно поддержание генерируемых колебаний в лазерном гироскопе. Предельные значения коэффициента усиления ограничиваются рассеянием светового пучка, сильно возрастающим при уменьшении длины волны.

Для этого предельно уменьшают рассеяние, создаваемое окнами, зеркалами и другими элементами конструкции полостей гироскопа. Однако связи, возникающие при рассеянии на газовых молекулах в квантовом генераторе, ограничивают коэффициент усиления светового контура таким значением, при котором скорость вращения меньше 1 *град/ч* обнаружить практически не представляется возможным.

Для лазерного гироскопа, имеющего площадь $A = 0{,}1$ *м*^{2}, зона захвата обычно составляет 100 *град/ч*, что соответствует разности частот колебаний генераторов, равной 100 *гц*, при длине волны ОКГ 632,8 *нм* (красный свет).

Уход нуля. Еще одним источником ошибок лазерного гироскопа является уход (или сдвиг) нуля. Эта ошибка эквивалентна фиксированному моменту смещения в обычном механическом гироскопе.

Сдвиг нуля объясняется возникновением в полости гироскопа газовых потоков. Существование этих потоков в гироскопе, квантовые генераторы которого питаются постоянным током, определяется столкновением молекул газа со стенками полостей гироскопа, распределениями электрического заряда вдоль стенок и электрического поля по ходу разряда газа.

Характер распределения газовых потоков в лазерном гироскопе приведен на рис. 13, где *1*, *2* — аноды, *3* — направление газового потока, *4* — катод, *5* — трубка.

Лазерный луч сконцентрирован в центральной части полости гироскопа и проходит через газ, движущийся к

катоду. Обратный ток газа происходит вдоль стенок трубки. Перемещение газа приводит к изменению показателя преломления, зависящего от относительных направлений перемещений энергии в лазерном луче и газовом потоке.

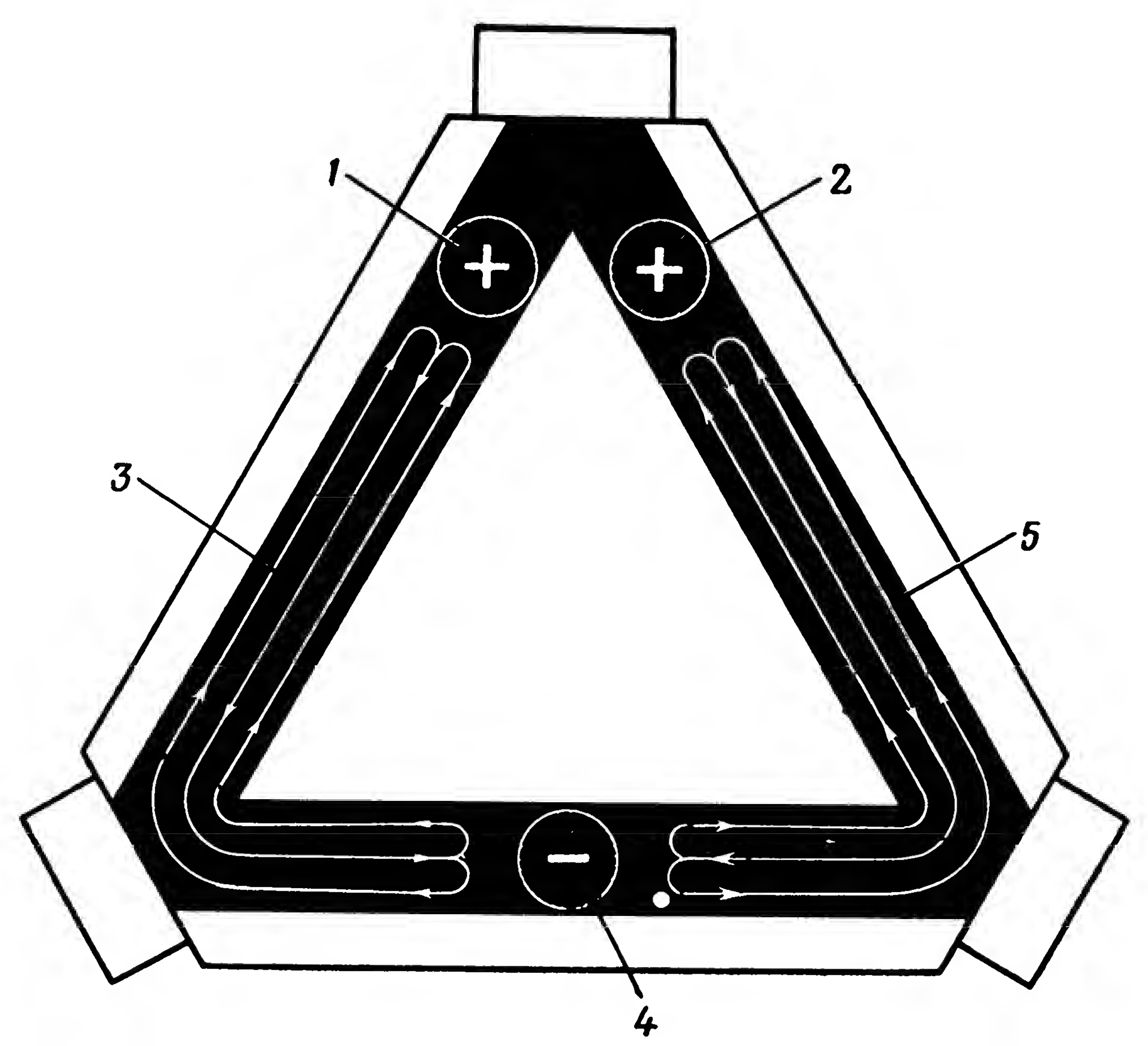


Рис. 13. Распределение газовых потоков в лазерном гироскопе

Поэтому полость гироскопа в одном направлении будет казаться несколько длиннее, чем в другом. Это явление и приводит к сдвигу нуля гироскопа.

Сдвиг нуля можно уменьшить, если гироскоп выполнить в виде симметричной конструкции с двумя анодами и одним катодом и осуществить балансировку анодных токов до получения минимального значения этого сдвига.

В гироскопе, имеющем только один анод, смещение нуля обычно оказывается эквивалентным выходной скорости вращения порядка нескольких сот градусов в час.

Верхний предел угловых скоростей, измеряемых лазерным гироскопом, определяется шириной полосы пропускания квантовых генераторов, примерно равной 1 *Ггц*.

Так как при скорости вращения 1 *град/ч* разность частот ОКГ составляет 1 *гц*, то гироскоп позволит измерять скорости вращения до 10^{-8} *град/ч*. Однако вследствие того что разность частот ОКГ составляет значительную часть полосы пропускания, возможно снижение этой скорости из-за нелинейности характеристики гироскопа. Как показывает зарубежный опыт, эта характеристика достаточно линейна только до значений скорости, равной $4 \cdot 10^6$ *град/ч*.

При больших скоростях вращения жесткие требования предъявляются и к полосе пропускания фотодетектора и усилителей. Например, по американским данным, при скорости вращения 10^8 *град/ч* полоса пропускания канала измерения должна составлять не менее 100 *Мгц*.

2.6. Методы повышения точности измерения лазерных гироскопов

Методы устранения влияния явления захвата основаны на придании гироскопу принудительного вращения (действительного или кажущегося) с известной постоянной скоростью. Это позволяет при измерении малых скоростей поворота сместить рабочие характеристики гироскопа в область более высоких скоростей, лежащих вне зоны нечувствительности, где явления захвата световых колебаний ОКГ не наблюдается. В этом случае результирующая скорость вращения лазерного гироскопа представляет собой алгебраическую сумму истинной скорости и скорости смещения.

Такое смещение может быть получено:

— вращением гироскопа с некоторой точно известной угловой скоростью;

— установкой на оптическом пути специальных элементов с показателями преломления, зависящими от направления движения луча (так называемые невзаимные элементы);

— принудительным движением активной газовой среды с известной угловой скоростью (использование явления увлечения Френеля — Физо).

Кратко рассмотрим эти способы.

Устранение явления захвата механическим вращением гироскопа. Смещение рабочей точки характеристики из зоны нечувствительности может быть фиксированным или периодическим. При фиксированном смещении, которое достигается вращением гироскопа, сигнал, пропор-

циональный истинной скорости вращения $\Delta f_{ист}$ гироскопа, получается вычитанием из результирующего сигнала $\Delta f_{рез}$ сигнала $\Delta f_{см}$ эквивалентного смещения.

Как видно из рис. 14:

$$\Delta f_{ист} = \Delta f_{рез} - \Delta f_{см}.$$

При отсутствии смещения угловая скорость $\Omega_{ист}$ лежит в зоне нечувствительности.

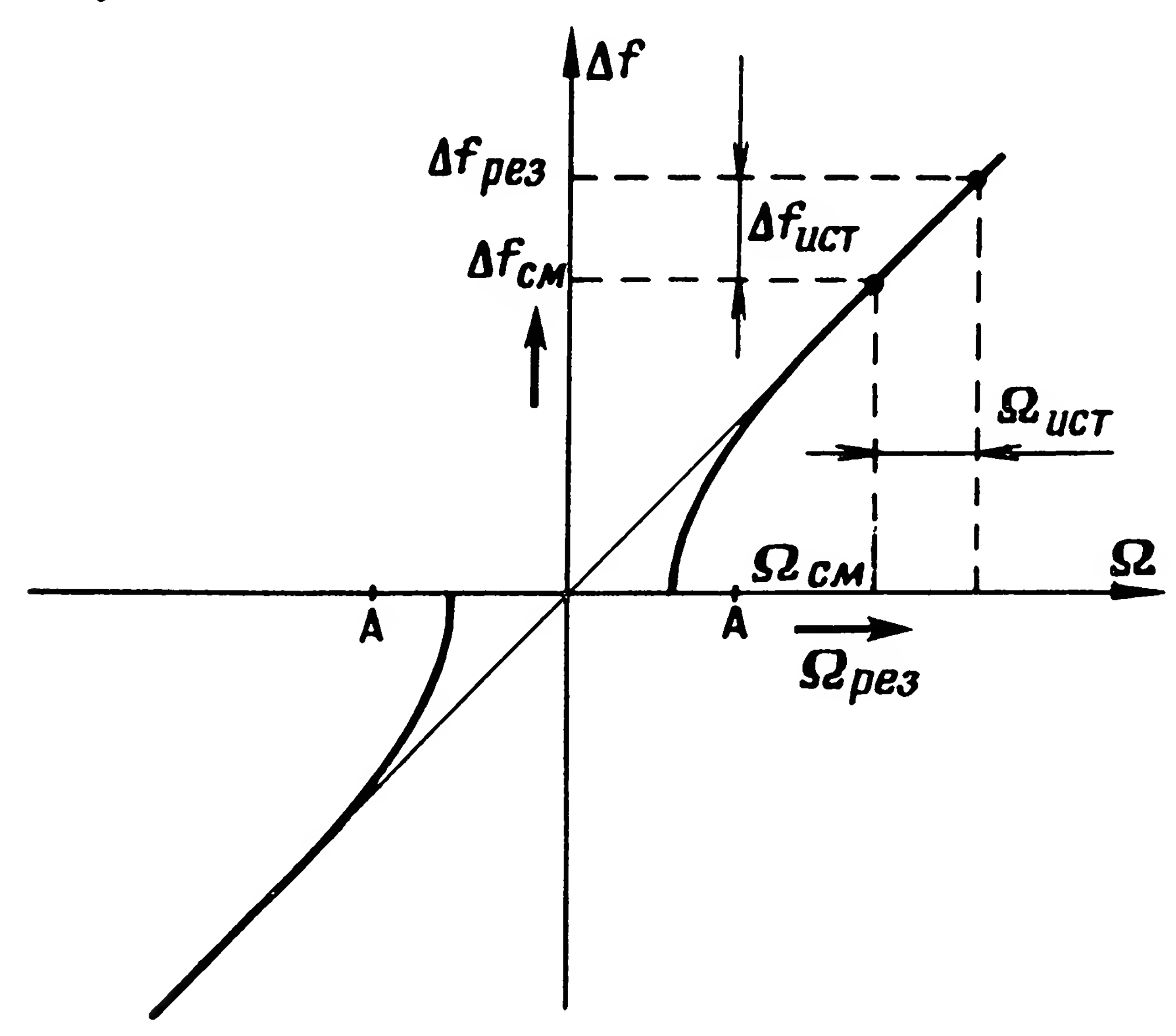


Рис. 14. Смещение рабочей точки на характеристике гироскопа из зоны нечувствительности

Основным недостатком фиксированного смещения являются жесткие требования к стабильности смещения. Например, для измерений угловых скоростей порядка 10^{-2} *град/ч* стабильность угловых скоростей смещения должна быть не менее 10^{-8} *град/ч*. Кроме того, усложняется конструкция гироскопа и уменьшается его устойчивость к нагрузкам.

Смещение гироскопа может быть периодическим. В этом случае требования к стабильности смещения гораздо менее жесткие. Периодическое смещение может быть создано механическим раскачиванием гироскопа или смещением рабочей точки с помощью оптических

элементов. В первом случае корпусу гироскопа сообщается колебательное движение с частотой 10—40 *гц* и амплитудой в несколько сот угловых секунд. Истинное угловое перемещение гироскопа складывается с угловым смещением в одну половину цикла и вычитается в другую при изменении направления смещения. Проинтегрированный выходной сигнал гироскопа представляет истинный угол поворота.

Устранение явления захвата с помощью элемента Фарадея. Этот способ создания кажущейся скорости смещения наиболее распространен и заключается в следующем. На некотором участке кольцевого лазера благодаря двум четвертьволновым пластинам *2* и *7* (рис. 15)

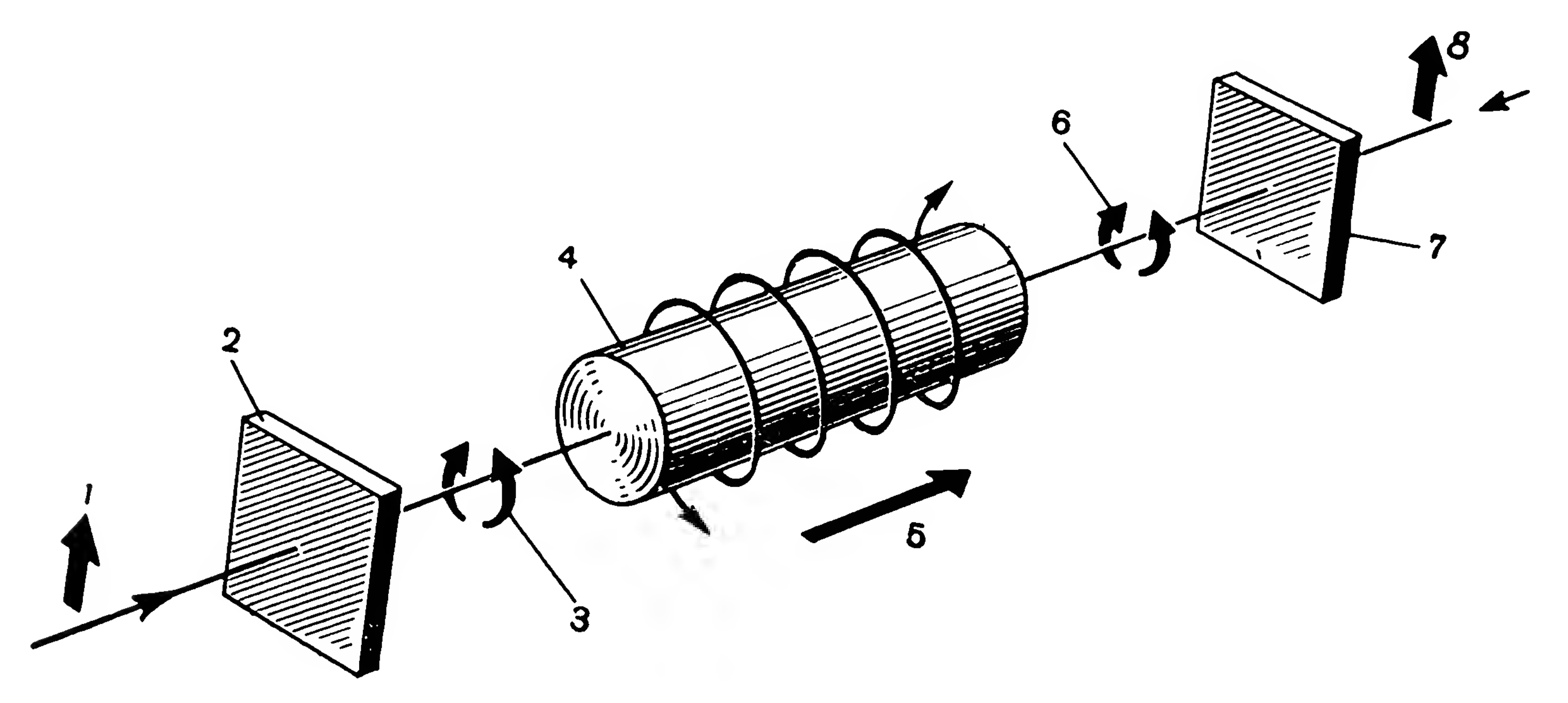


Рис. 15. Элемент Фарадея

два встречных луча *1* и *8* с линейной поляризацией превращаются в лучи с противоположными (*3* и *6* соответственно) направлениями круговой поляризации. При прохождении встречных лучей через магнитоактивную среду *4* (например, через стекло или кварц), находящуюся в магнитном поле *5*, проявляется действие эффекта Фарадея: световые лучи распространяются с различными фазовыми скоростями. Поэтому даже при отсутствии вращения гироскопа частоты встречных лучей различны, а их разность Δf пропорциональна величине магнитного поля.

При введении подобных оптических элементов в полость гироскопа оптический путь в одном направлении становится большим, чем в другом. Таким образом, рабочая точка характеристики гироскопа выходит из зоны захвата.

Использование эффекта увлечения Френеля — Физо. Этот способ борьбы с явлением захвата также позволяет избавиться от необходимости вращать или колебать весь гироскоп.

Способ сводится к введению в резонатор движущейся оптически прозрачной среды. Если используемая жидкость имеет показатель преломления n и скорость протекания v, то скорость распространения света в этой среде

$$V = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right),$$

где $\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ — коэффициент увлечения Френеля;

c — скорость распространения света в вакууме.

Частичное смещение, полученное за счет протекания жидкости на длине резонатора l, определяется формулой

$$\Delta f_{\text{см}} \approx \frac{2lv\,(n^2 - 1)}{p \cdot n}.$$

При $n = 1{,}0002926$, $\lambda = 0{,}6328$ *мкм*, $p = 3$ *м*, $l = 0{,}7$ *м* и $v = 1$ *м/сек* величина смещения $\Delta f_{\text{см}} = 430$ *гц*, что превышает зону захвата для гироскопа с заданным периметром.

К недостаткам этого способа следует отнести трудность обеспечения постоянства скорости протекания жидкости и исключения ее турбулентности.

Вместо жидкости можно использовать направленный дрейф атомов в активном веществе, что может быть достигнуто питанием резонатора постоянным током.

2.7. Способы повышения стабильности работы лазерного гироскопа

Важнейшим фактором, влияющим на стабильность работы гироскопа, является геометрическое постоянство оптического пути лазерных лучей.

Нестабильность оптического пути вызывает соответствующие изменения частот лазерных лучей, оказывает влияние на явление захвата частот и непосредственно снижает точность измерений. Поэтому в лазерном гироскопе зарубежные специалисты в первую очередь стремятся обеспечить постоянство его оптического тракта, где распространяются лазерные лучи.

В этих целях предполагается использование пьезоэлектрических элементов с укрепленными на них зеркалом или призмой, входящими в состав светового контура лазерного гироскопа. Пьезоэлектрический элемент управляется так называемым сигналом ошибки с помощью следящей системы.

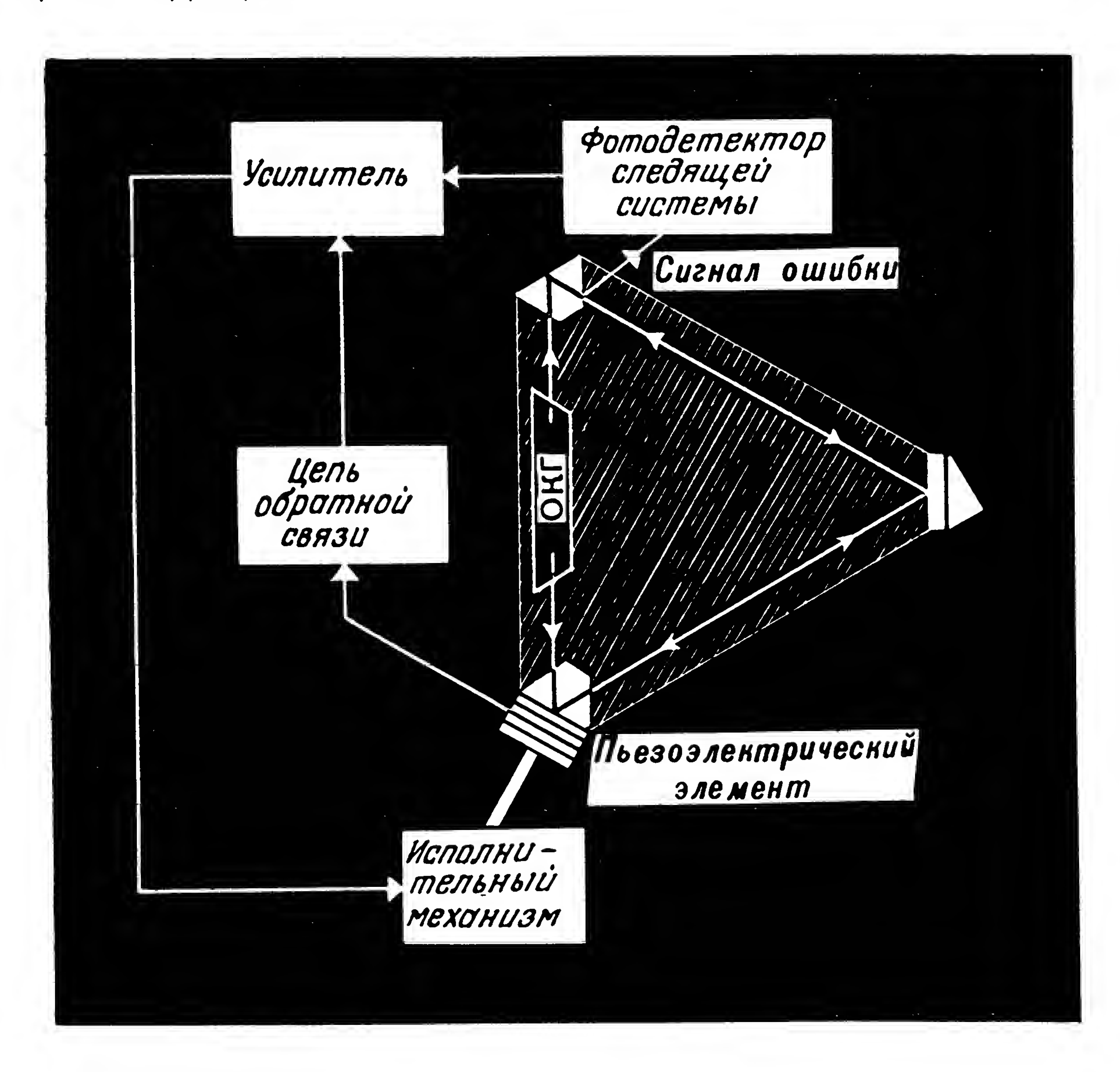


Рис. 16. Принципиальная схема компенсации изменения длины оптической полости гироскопа

На рис. 16 изображена принципиальная схема такой системы с пьезоэлектрическим элементом, предложенная французскими специалистами.

Изменение длины оптической полости гироскопа вызывает появление сигнала ошибки, соответствующего этому изменению. Сигнал ошибки выделяется фотодетектором следящей системы и через усилитель и исполнительный механизм воздействует на пьезоэлектрический

элемент с размещенной на нём призмой. Таким образом изменения оптического пути лазерных лучей компенсируются изменением положения призмы.

Применение указанной стабилизации позволило французам измерить скорость вращения Земли с точностью до 0,01 *град* в течение нескольких минут.

Имеются и другие факторы, влияющие на точность измерений гироскопа, например нестабильность коэффициента усиления оптического контура гироскопа, а также так называемые дифференциальные потери.

Однако в ближайшее время, по мнению иностранных специалистов, точности измерений лазерных гироскопов будут ограничиваться не принципиальными особенностями метода измерений, а технологией изготовления гироскопов, способами создания смещающих скоростей и другими техническими факторами.

О прогрессе в этой области можно судить по некоторым образцам иностранных лазерных гироскопов. Если в 1963 г. лазерный гироскоп с контуром, имеющим площадь 1 *м*^{2}, обладал порогом измерений, равным 50 *град/ч*, то к 1967 г. оптический гироскоп с площадью контура на порядок меньше мог уже измерять скорости, равные 0,1 *град/ч*.

Можно с уверенностью сказать, что возможности в повышении точности лазерных гироскопов далеко еще не исчерпаны и здесь возможны большие успехи.

Глава III

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Как уже отмечалось, в настоящее время известны только экспериментальные лазерные гироскопы. Однако можно предполагать, что благодаря своим преимуществам они в ближайшем будущем найдут широкое применение в качестве чувствительных элементов в системах автоматического управления и стабилизации.

Лазерные гироскопы могут быть использованы в качестве датчиков угловой скорости вращения объектов.

Рассмотрим вначале работу обычного электромеханического датчика угловой скорости (ДУС). Принцип действия такого прибора основан на измерении гироскопического момента, возникающего при вращении двухстепенного гироскопа с определенной угловой скоростью относительно оси чувствительности.

Принципиальная схема электромеханического датчика угловой скорости представлена на рис. 17.

Основными элементами датчика являются: двухстепенной гироскоп, состоящий из ротора *1*, рамки *2*, пружины *3*, демпфера *4* и устройства для съема выходного сигнала *5* (в данном случае потенциометрический датчик).

Ось *OY*, перпендикулярная плоскости рамки *2*, называется осью чувствительности или измерительной осью (иногда ее называют «входной» осью).

Ось рамки *OX*, являющаяся осью подвеса, называется «выходной» осью прибора.

Ось *OZ* является осью собственного вращения ротора, по этой оси направлен вектор кинетического момента $\bar{H}$.

Такой прибор реагирует на угловую скорость, вектор которой перпендикулярен плоскости рамки.

При развороте объекта, на котором установлен ДУС, вокруг оси чувствительности OY с угловой скоростью ω_y возникает гироскопический момент $M_г$. Этот момент

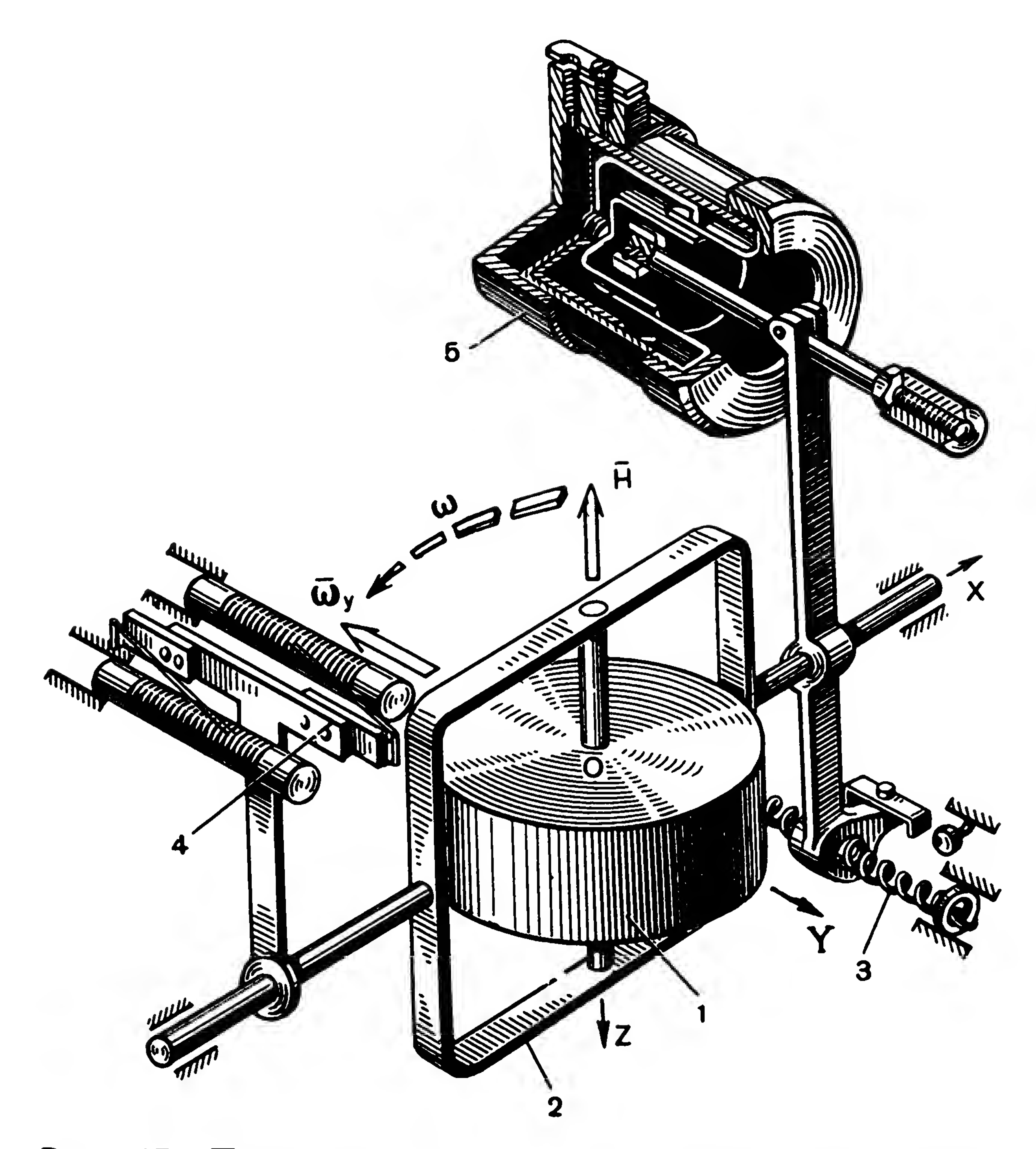


Рис. 17. Принципиальная схема электромеханического ДУС

стремится совместить наикратчайшим путем вектор кинетического момента $\bar{H}$ с вектором угловой скорости $\bar{\omega}_y$. При этом гироузел начинает вращаться вокруг оси OX в указанном пунктирной стрелкой направлении. Пружина *3*, противодействуя повороту гироузла, деформируется, в результате чего возникает момент $M_{пр}$.

Гироскопический момент $M_г$ пропорционален величинам H и ω_y, но так как кинетический момент H для данного прибора является постоянной величиной, то величи-

на гироскопического момента будет меняться лишь с изменением угловой скорости ω_y разворота объекта. При уравновешивании гироскопического момента моментом пружины гироузел, отклонившись на определенный угол β, остановится. Таким образом, угол отклонения гироскопа β будет пропорционален измеряемой скорости.

Выходной сигнал снимается в виде напряжения с потенциометрического датчика *5*. Демпфер *4* служит для гашения собственных колебаний гироузла.

Предполагается, что лазерные гироскопы с успехом будут использоваться в качестве датчиков угловой скорости. Такие датчики могут применяться: в автопилотах для введения в управляющую функцию сигнала, пропорционального угловой скорости; на спутниках и космических кораблях в качестве чувствительных элементов демпфирующих устройств, гасящих колебания объекта относительно центра масс, а также для ограничения угловой скорости разворота космических объектов при их ориентации. Кроме того, лазерный гироскоп может быть использован как компас, с большой точностью указывающий направление географического меридиана.

В заключение следует отметить, что применение лазерного гироскопа в качестве чувствительного элемента не ограничивается лишь рассмотренными выше приборами и системами.

Так, например, если на выходе лазерного гироскопа установить интегрирующее устройство, то с него можно получить сигнал, пропорциональный углу поворота основания гироскопа, установленного на объекте. Таким образом, лазерный гироскоп превратится в прибор, назначение которого совпадает с назначением интегрирующего гироскопа. Поэтому в качестве примера еще одного возможного варианта применения лазерного гироскопа можно было бы рассматривать различные системы управления, использующие интегрирующие гироскопы.

Кроме использования в системах ориентации и стабилизации движущихся объектов лазерные гироскопы могут найти применение и в различных отраслях народного хозяйства, например для измерения скорости потоков жидкости и газов, измерения дрейфа континентов и т. д.

Рассмотрим некоторые возможные схемы применения

лазерного гироскопа в качестве чувствительного элемента систем автоматического управления различного рода подвижными объектами.

3.1. Лазерный гирокомпас

Для определения направления движения объекта необходимо знать его курс, т. е. угол, составленный проекцией вектора скорости оси объекта на плоскость горизонта и направлением меридиана. Для измерения курса применяют самые разнообразные методы: магнитные, гироскопические, астрономические и радиотехнические.

Не останавливаясь на рассмотрении принципов работы курсовых приборов, основанных на перечисленных методах, можно отметить, что ни один из них не может обеспечить точное измерение курса при различных параметрах и в разных условиях движения. Каждая из курсовых систем имеет свои недостатки и достоинства; недостатки одной системы в какой-то мере перекрываются достоинствами другой. Поэтому в настоящее время применяются комплексные курсовые системы, объединяющие различные измерители курса, что имеет целый ряд преимуществ по сравнению с раздельным применением курсовых приборов.

Вместе с тем проводятся исследования по изысканию новых методов измерения курса, еще более точных, надежных и быстродействующих.

Так, например, считается возможным использовать в качестве компаса прибор, чувствительным элементом которого является лазерный гироскоп.

На рис. 18 представлена упрощенная конструктивная схема такого лазерного гироскопа.

Гелий-неоновый кольцевой лазер *1*, заключенный в кварцевый монолитный блок, установлен на плоской плите *2*. Плита в свою очередь прикреплена к металлическому валу, установленному в подшипниках *3*. С помощью двигателя *5* плита с лазерным гироскопом приводится во вращение с постоянной скоростью вокруг вертикальной оси.

На корпусе *4*, имеющем цилиндрическую форму, устанавливается подшипник *6*. Внутреннее кольцо подшип-

ника насажено на корпус, а наружное запрессовано в кольцеобразное основание кронштейна *7*, на котором укреплен отсчетный источник света *8*. Таким образом,

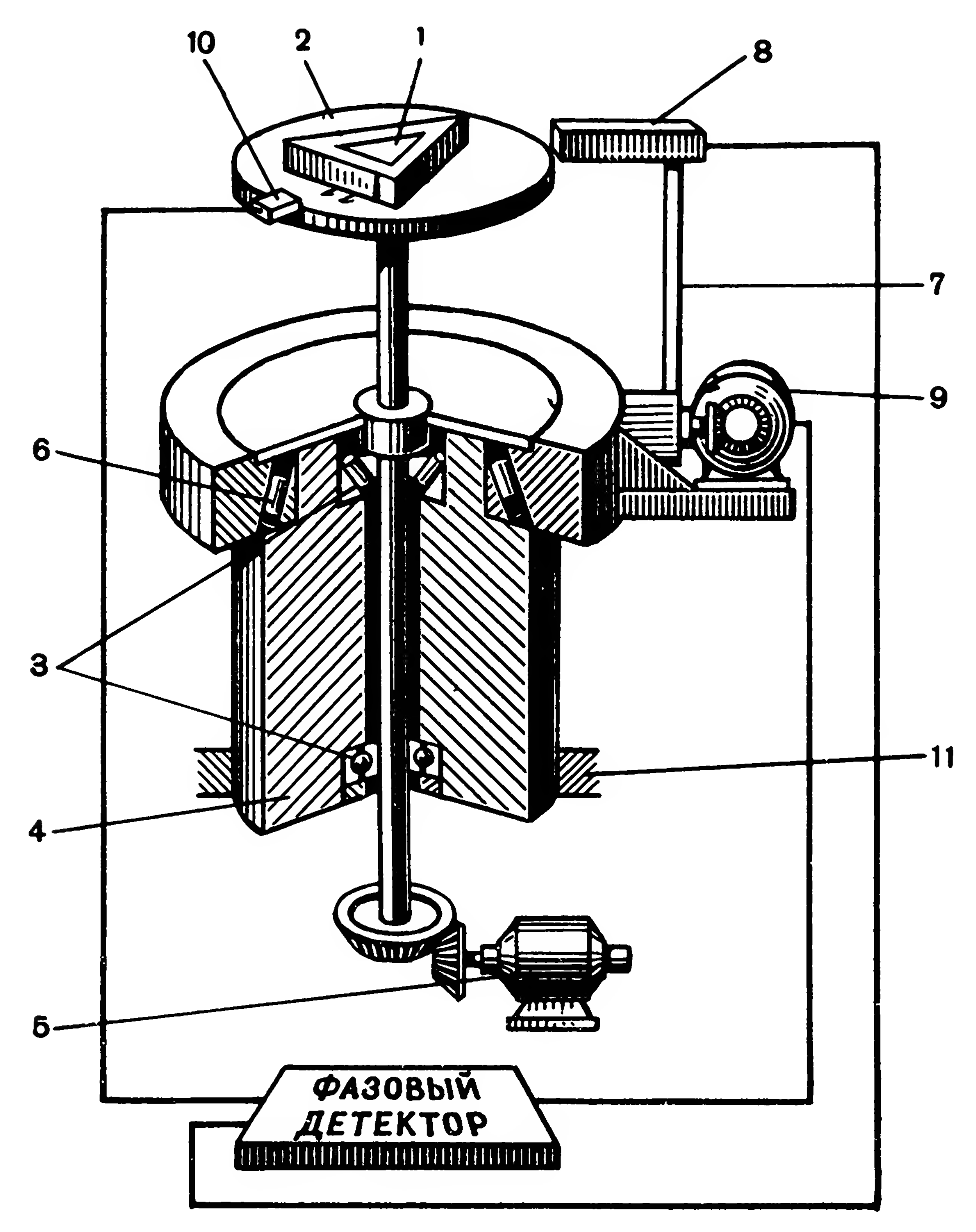


Рис. 18. Конструктивная схема лазерного гирокомпаса

источник света также имеет возможность вращаться вокруг той же вертикальной оси. Его вращает серводвигатель *9*, управляемый сигналами с фотоэлектронного умножителя *10* и отсчетного источника света, сравниваемыми на фазовом детекторе.

Корпус *4* монтируется на платформе *11*, заключенной в карданный подвес и стабилизируемой в плоскости горизонта с помощью управляющих сигналов по крену и тангажу, снимаемых с центральной гировертикали.

Коротко рассмотрим принцип работы такого гиро-

компаса. Как известно, частота биений светового сигнала кольцевого лазера пропорциональна угловой скорости Ω его вращения, вектор которой совпадает с направлением оси чувствительности лазерного гироскопа. Ось чувствительности лазерного гироскопа в данном случае расположена в плоскости горизонта и перпендикулярна плоскости плиты *2*. Угловая скорость, которую гироскоп измеряет, есть проекция горизонтальной составляющей вектора вращения Земли $u_г$ на направление оси чувствительности гироскопа. Направление оси чувствительности определяется положением плиты *2* в азимутальной плоскости. При этом горизонтальная составляющая вектора $u_г$ вращения Земли совпадает с направлением меридиана. В рассматриваемой конструкции плита с гироскопом приводится во вращение вокруг вертикальной оси, перпендикулярной оси чувствительности, с постоянной угловой скоростью от двигателя *5*, также установленного на стабилизированной платформе. При этом сигнал, снимаемый с гироскопа, будет максимальным в момент, когда плита при своем вращении займет положение, перпендикулярное вектору горизонтальной составляющей скорости Земли, и минимальным при параллельном положении плиты относительно вектора горизонтальной составляющей скорости Земли (на экваторе).

Таким образом, при вращении плиты *2* с постоянной скоростью сигнал, полученный с лазерного гироскопа, становится частотно-модулированным. Период модуляции соответствует скорости вращения плиты *2*. Модулированные колебания с фазоэлектронного умножителя детектируются дискриминатором, с выхода которого снимается синусоидальное напряжение с частотой модуляции.

Отсчетный источник света, расположенный около оси вращения, выдает импульс света каждый раз, когда луч его перпендикулярен плоскости плиты *2*. Эти импульсы подаются на фазовый детектор для выделения фазы выходного напряжения дискриминатора.

На рис. 19 приведены временные диаграммы, поясняющие рассмотренное.

С помощью фазового детектора можно измерить фазу между отсчетным импульсом и экстремумами выходного сигнала дискриминатора. Если луч от отсчетного источника света не параллелен вектору $u_г$, т. е. его на-

правление не совпадает с направлением меридиана (фаза между экстремумом сигнала и началом отсчетного импульса не равна нулю), то с интегрального выхода фазового детектора снимается сигнал ошибки в виде напряжения, величина и знак которого зависят от фазы φ_0 между экстремумом сигнала и отсчетным импульсом.

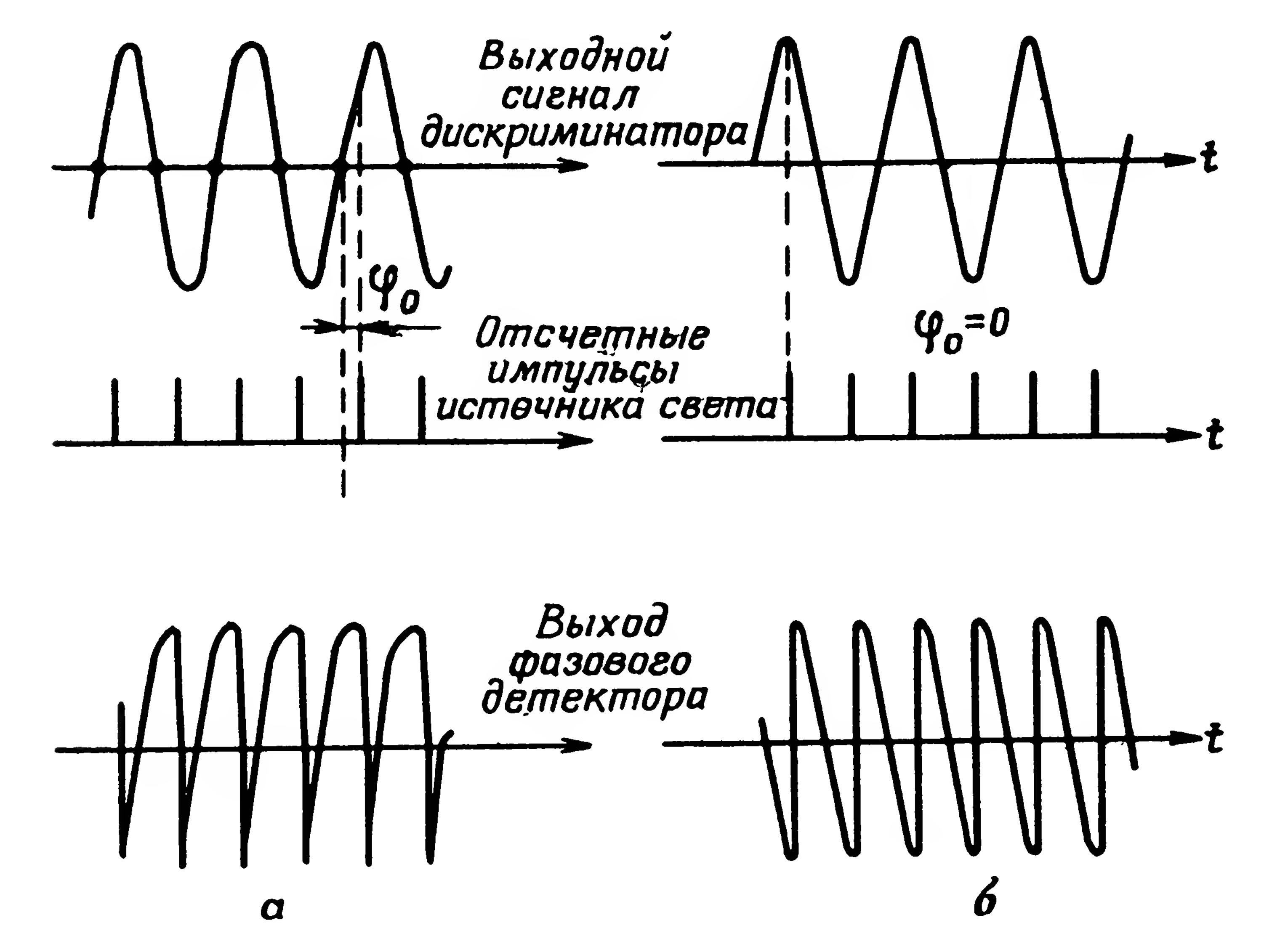


Рис. 19. Временные диаграммы сигналов лазерного гирокомпаса:

а — луч от источника света не совпадает с направлением магнитного меридиана; *б* — луч от источника света совпадает с направлением магнитного меридиана

Но в то же время φ_0 есть угол между двумя последовательными положениями плиты, где первое соответствует моменту времени, когда перпендикуляр к плите не совпадает с направлением меридиана (рис. 19, *а*), а второе — когда он совпадает с направлением меридиана (рис. 19, *б*).

Напряжение с выхода фазового детектора подается на серводвигатель, который устанавливает начало отсчета, т. е. вращает источник света до тех пор, пока сигнал ошибки с выхода фазового детектора не станет симметричным по форме (при $\varphi_0=0$). При этом луч света совпадет с направлением вектора $u_г$ и укажет направление на север.

Для данного прибора основными ошибками являются систематические, возникающие вследствие неточностей периодов вращения плиты из-за дефектов вала и подшипников. Однако тщательной регулировкой эти ошибки могут быть уменьшены и даже полностью исключены, если отказаться от динамического метода измерений, т. е. не вращать плиту вокруг оси, параллельной плоскости лазера.

Однако при статическом методе измерений время, необходимое для определения северного направления, значительно увеличится.

Использование лазерного гироскопа в курсовых системах позволит значительно улучшить их характеристики по точности определения курса и быстродействию.

3.2. Датчики угловых скоростей в схеме автопилота

Как известно, автопилоты (АП) — это устройства, которые автоматически управляют самолетом или крылатой ракетой, обеспечивая полет по заданной траектории. Автопилоты не только устраняют вредное влияние возмущающих внешних факторов (например, ветра), но и могут изменять режим полета объекта по требуемому закону.

В основу работы схемы автопилота положен принцип стабилизации объекта по углам. Сигналы, пропорциональные угловым отклонениям, воздействуют на органы управления, которые и стабилизируют объект относительно центра тяжести, т. е. по курсу, крену и тангажу (рис. 20).

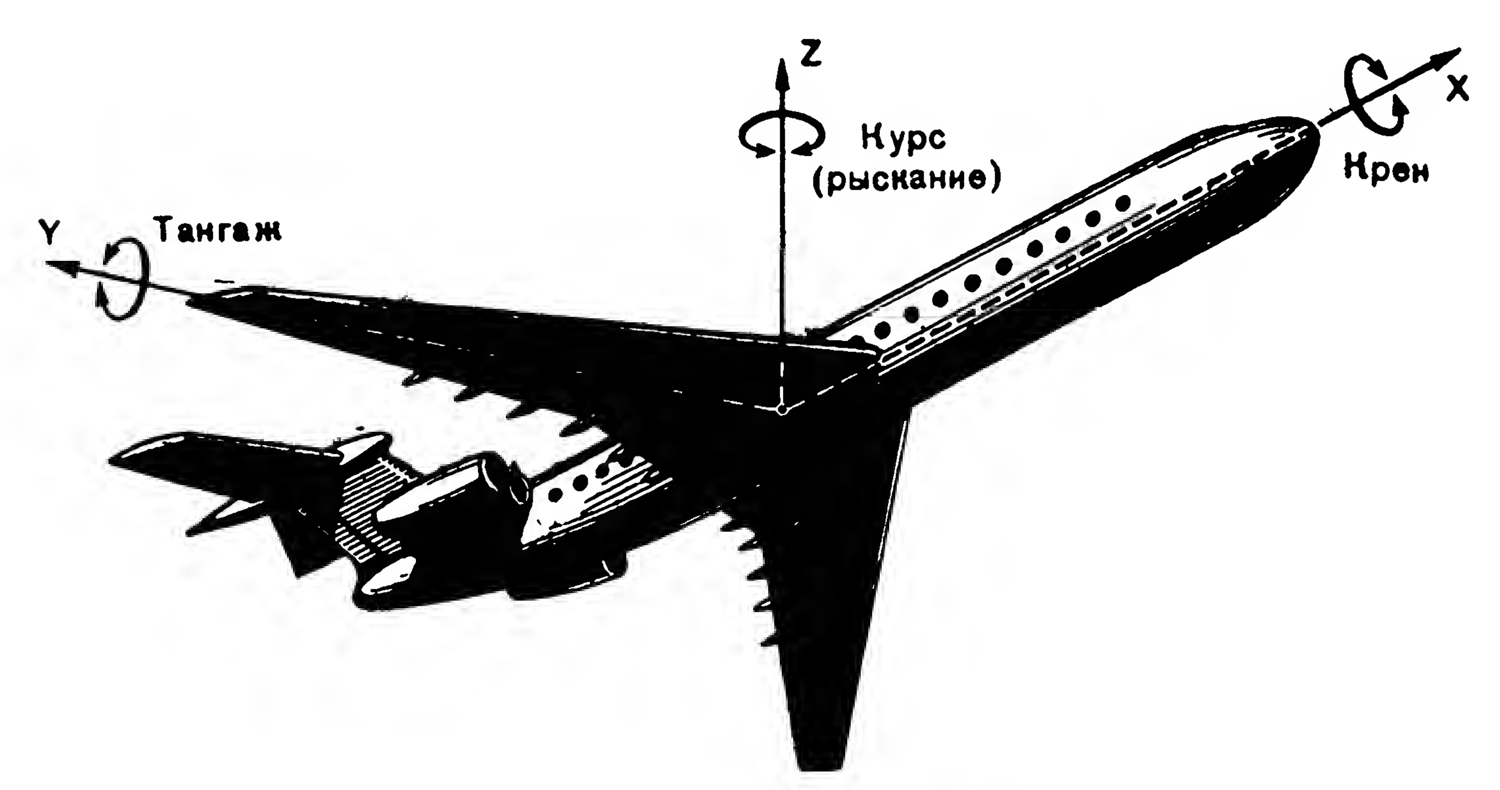


Рис. 20. Угловые отклонения самолета относительно его центра тяжести

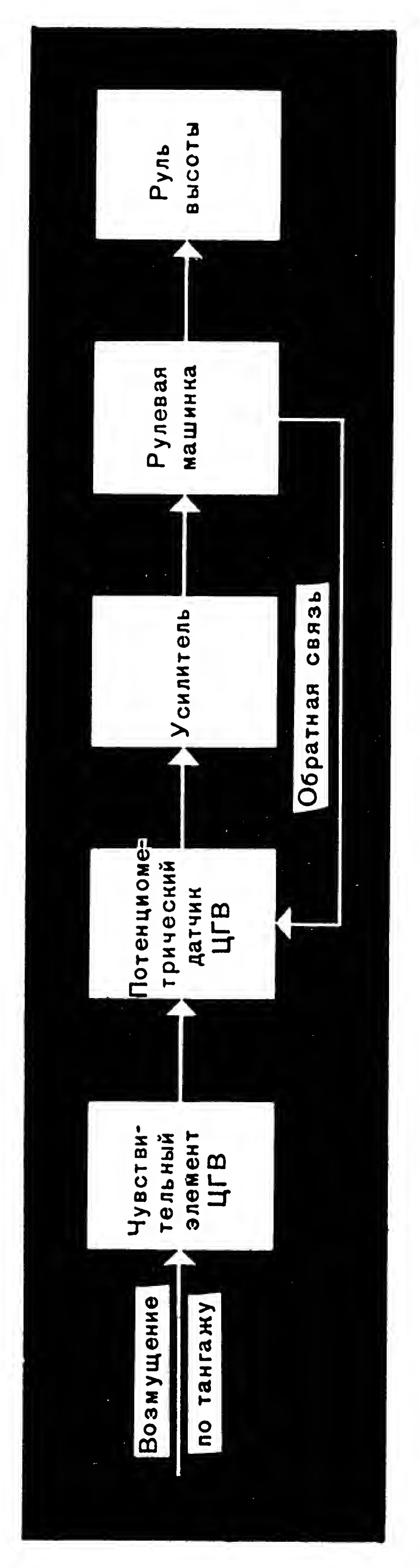


Рис. 21. Упрощенная структурная схема стабилизации самолета по тангажу

В качестве чувствительных элементов, реагирующих на угловые отклонения объекта, до настоящего времени еще используются приборы на базе электромеханических гироскопов с тремя степенями свободы. Обычно это центральная гировертикаль (ЦГВ) и гирополукомпас (ГПК). ЦГВ стабилизирует объект в плоскости горизонта (крен и тангаж), а ГПК осуществляет стабилизацию по курсу.

При необходимости углы курса, крена и тангажа могут быть изменены в соответствии с маршрутом полета, заданным программным механизмом.

Структурные схемы систем управления по курсу, крену и тангажу аналогичны, поэтому остановимся лишь на одной из них.

На рис. 21 показана упрощенная структурная схема автоматической системы управления полетом самолета по тангажу.

При отклонении самолета от заданного положения (возмущение по тангажу) сигнал, пропорциональный угловому отклонению

самолета вокруг оси *OY* и снимаемый с потенциометрического датчика ЦГВ, поступает на усилитель. Усиленный сигнал подается на электродвигатель рулевой машинки, который перемещает рули высоты в нужную сторону.

При этом от датчика обратной связи (обычно потенциометра, расположенного на тросовом барабане рулевой машинки) на вход потенциометрического датчика ЦГВ подается сигнал, пропорциональный угловой скорости перемещения барабана рулевой машинки. Сигнал находится в противофазе с управляющим сигналом от ЦГВ (отрицательная обратная связь), вследствие чего при достижении рулевой машинкой скорости вращения, соответствующей величине управляющего сигнала, суммарный ток на входе усилителя будет равен нулю. Руль высоты отклонится на некоторый угол, и под действием его аэродинамических свойств самолет начнет возвращаться к заданному направлению полета.

На входе усилителя управляющий сигнал уменьшится и руль высоты начнет устанавливаться в прежнее положение. Когда самолет возвратится в начальное положение, руль высоты окажется в нейтральном положении.

Однако самолет, имеющий большую массу, не остановится в этом положении, а по инерции пройдет его и отклонится в другую сторону относительно оси *OY*. Автопилот вновь начинает возвращать самолет к оси *OY*. Таким образом, процесс возвращения самолета в первоначальное положение будет происходить с колебаниями. Эти колебания в значительной мере ухудшают устойчивость самолета, затрудняют управление объектом и при больших скоростях полета могут даже привести к аварии.

Для уменьшения таких колебаний объекта необходимо рули отклонять с некоторым опережением, которое зависит от величины и направления углового отклонения. Это опережение может быть создано с помощью специальных автоматических устройств — демпферов.

Для получения опережения чувствительный элемент демпфера должен реагировать на угловую скорость разворота объекта. Введение в систему управления автопилотом демпфирующего сигнала, пропорционального угловой скорости, в значительной мере улучшает его характеристики и устойчивость к колебаниям.

В качестве чувствительных элементов демпфера с успехом могут быть использованы датчики угловых ско-

ростей (ДУС) на лазерах, сигналы которых с большой степенью точности пропорциональны угловым скоростям объекта.

В зависимости от положения оси чувствительности лазерный ДУС будет реагировать на угловую скорость вращения объекта относительно только одной определенной оси (например, OX, OY или OZ).

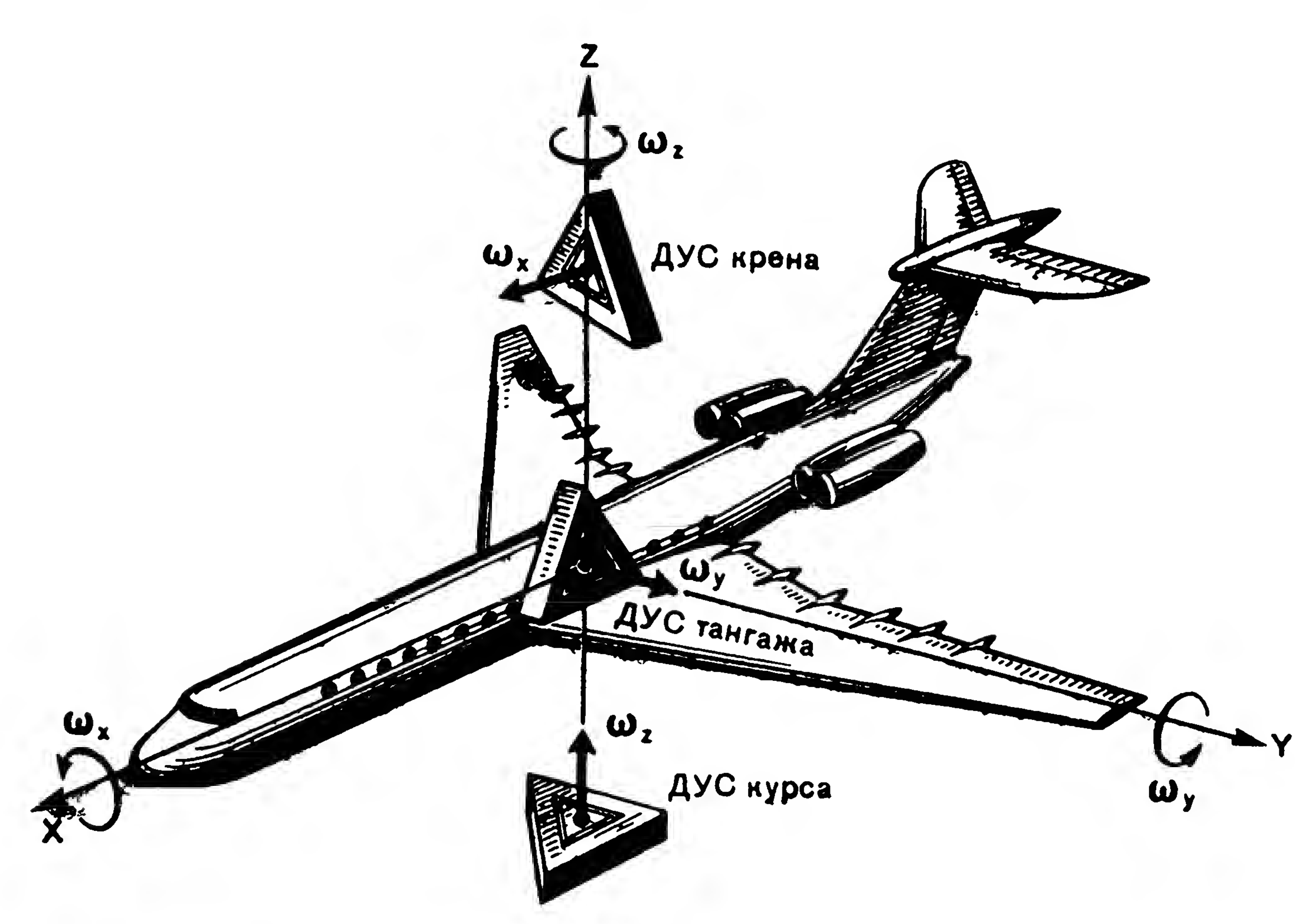


Рис. 22. Схема установки лазерных ДУС для измерения угловых скоростей самолета

В зависимости от того, какую угловую скорость воспринимает ДУС и относительно какой оси самолета демпфер гасит колебания, различают демпферы крена (относительно оси OX), рыскания (относительно оси OZ) и тангажа (относительно оси OY).

На рис. 22 приведена схема установки трех датчиков угловых скоростей на лазерах на летательном аппарате для измерения угловых скоростей ω_x, ω_y и ω_z его вращения относительно всех трех осей.

За рубежом считают, что в автопилоте для демпфирования самолета по трем осям наиболее рациональным будет использование трехосного монолитного блока лазерных гироскопов.

Рассмотрим (рис. 23) принципы работы демпфирующего устройства автопилота по одному из каналов (на-

пример, каналу тангажа). Это устройство работает аналогично соответствующему каналу управления автопилота с использованием электромеханических гироскопов.

При появлении угловой скорости ω_y разворота самолета лазерный ДУС *1* выдает сигнал, пропорциональный этой скорости. В усилителе сигнал усиливается и по-

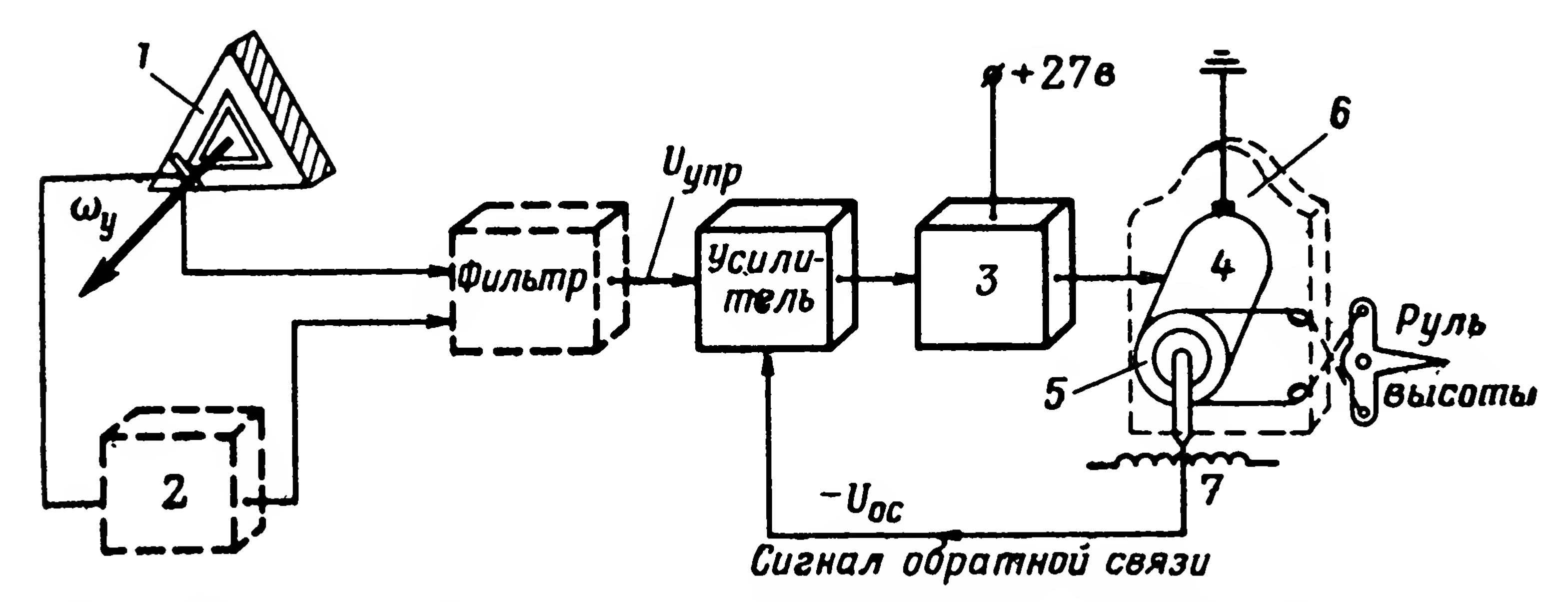


Рис. 23. Схема автопилота с демпфирующим устройством (канал тангажа)

дается на обмотку силового реле *3*, которое, срабатывая, подает напряжение бортовой сети на электродвигатель *4* рулевой машинки *6*. Тросовый барабан *5* рулевой машинки отклоняет руль высоты в нужное направление для парирования возникающей угловой скорости отклонения объекта.

Поворачиваясь, тросовый барабан *5* рулевой машинки перемещает закрепленную на нем щетку потенциометра обратной связи *7*, вследствие чего в усилитель поступает сигнал обратной связи $U_{ос}$. Этот сигнал, складываясь с сигналом $U_{упр}$ от лазерного датчика угловой скорости, вызывает своевременное прекращение движения тросового барабана при $U_{упр} - U_{ос} = 0$.

В некоторых случаях в закон управления объектом требуется ввести не только сигнал, пропорциональный угловой скорости разворота, но и сигнал, пропорциональный угловому ускорению объекта. В этом случае выходной сигнал лазерного ДУС подается на усилитель через дифференцирующее устройство *2*.

Для того чтобы работа демпфера не отразилась на маневренности самолета, в его схему включают специальный фильтр, пропускающий на усилитель только переменную составляющую сигнала ω_y, возникающую при колебаниях объекта.

Аналогично построены схемы демпфирующих устройств по двум другим осям вращения объекта.

3.3. Лазерный гироскоп в системе ориентации космического летательного аппарата

Системы управления космическими летательными аппаратами (КЛА) обычно предназначены для обеспечения ориентации и стабилизации положения объекта на траектории полета в межпланетном пространстве или на орбите ИСЗ.

По принципу построения такие системы (как и автопилоты) являются замкнутыми системами управления, которые включают в себя объект управления (КЛА), измерительные (чувствительные) устройства, выдающие информацию о параметрах движения объекта, усилительно-преобразующие и логические устройства, формирующие требуемый закон управления движением объекта, а также исполнительные устройства, обеспечивающие создание необходимых сил и моментов.

В качестве исполнительных устройств, изменяющих ориентацию КЛА, в таких системах могут применяться обыкновенные и верньерные (шарнирно-подвешенные) реактивные двигатели, двигатели-маховики, представляющие собой вращающиеся массы с большим кинетическим моментом, а также специальные устройства, использующие магнитное поле Земли или энергию солнечного излучения.

Наряду с электромеханическими гироскопами, фотоследящими измерительными и различными астросистемами в качестве чувствительных элементов автоматических систем управления КЛА с успехом могут быть использованы лазерные гироскопы. Последние благодаря своим достоинствам смогут упростить существующие системы управления и в значительной мере повысить их точность.

Рассмотрим один из вариантов автоматической системы ориентации блоков солнечных батарей, позволяющей максимально использовать энергию солнечных лучей.

Такая система состоит из фотоэлектрического датчика Солнца, трех лазерных датчиков угловых скоростей, усилительно-преобразовательного блока, логического устройства и исполнительных устройств (малых реактивных двигателей). Солнечные батареи с помощью та-

кой системы ориентируются путем сравнения сигналов фотоэлектрического датчика и лазерных датчиков угловой скорости в логическом устройстве.

Фотоэлектрический датчик Солнца, неподвижно установленный на поверхности солнечных батарей, выдает сигнал релейного типа («да — нет»), указывая, освещено или не освещено соответствующее поле зрения датчика. Таким образом, фотоэлектрический датчик в системе управления служит для отыскания Солнца, поскольку первоначальное положение солнечных батарей может быть произвольным. После установки батарей в освещенной Солнцем части пространства объект в ориентированном положении удерживается при совместной работе фотодатчика и лазерных гироскопов.

Исполнительные устройства (малые реактивные двигатели) дают при включении тягу постоянной величины. Они могут быть только или включены, или выключены; кроме того, логическое устройство может также обеспечить импульсный режим работы двигателей.

Рассмотрим работу системы при ориентации КЛА по одной из осей (например, по оси Z), предполагая, что по двум другим осям батареи на Солнце уже ориентированы. Принципиальная схема такой автоматической системы представлена на рис. 24.

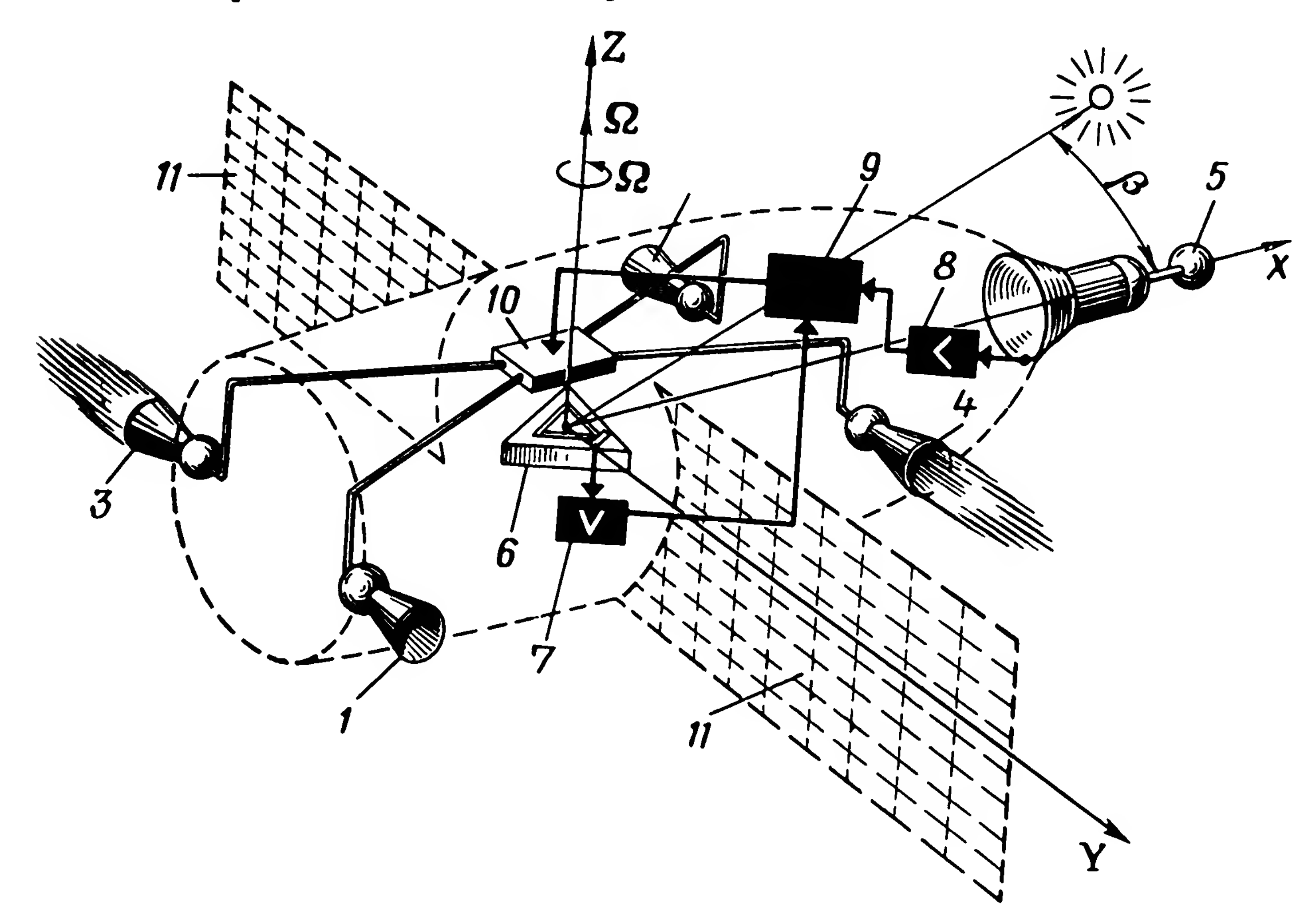


Рис. 24. Схема ориентации солнечных батарей на космических объектах с помощью лазерных ДУС

Следует отметить, что лазерный ДУС *6* в этом случае может работать в режиме поиска и режиме обычного нуля индикатора скорости. В первом случае лазерный ДУС имеет загрубленный порог чувствительности на величину Ω_0 (порог чувствительности — это та минимальная угловая скорость ω_{min}, которую может измерить прибор); во втором случае лазерный ДУС работает в обычном режиме, когда его порог чувствительности соответствует ω_{min}.

При отсутствии Солнца в поле зрения фотоэлектрического датчика *5* командный сигнал ориентации по оси *Z* поступает в логическое устройство *9* системы управления. После преобразования командный сигнал поступает на электромагнит золотникового устройства *10*, которое запускает ракетные двигатели (например, *1* и *2*), обеспечивающие разворот КЛА вокруг оси *Z* с постоянной угловой скоростью Ω. Лазерный ДУС *6* в этом случае работает в первом режиме.

При достижении угловой скорости вращения КЛА вокруг оси *Z* величины Ω_0 логическое устройство отключает двигатели *1* и *2* и вращение КЛА в дальнейшем происходит по инерции.

После попадания Солнца в поле зрения фотоэлектрический датчик вырабатывает сигнал, который усиливается в усилителе *8* и подается на логическое устройство *9*. Логическое устройство в свою очередь включает двигатели *3* и *4*, которые, работая в непрерывном режиме, обеспечивают быстрое торможение КЛА. Одновременно логическое устройство переводит лазерный ДУС *6* в режим нуль-индикатора скорости, снимая смещение Ω_0 порога чувствительности.

При уменьшении абсолютной угловой скорости разворота КЛА вокруг оси *Z* до величины, равной верхней границе зоны нечувствительности плюс Ω_1, логическое устройство переключает двигатели *3* и *4* в импульсный режим работы. После уменьшения угла рассогласования β до величины, соответствующей нижней границе зоны нечувствительности минус Ω_2, логическое устройство выключит двигатели *3* и *4*. Объект при этом будет продолжать вращаться по инерции с угловой скоростью близкой к $-\Omega_2$, и в конечном счете Солнце выйдет из поля зрения фотоэлектрического датчика.

Система ориентации возобновит поиск Солнца, лазерный ДУС переведется в первый режим работы (на

него вновь подается смещение Ω_0). Ввиду малости угловой скорости Ω_2 КЛА не успеет значительно отклониться от Солнца, поэтому оно практически сразу попадет в поле зрения фотоэлектрического датчика и весь рассмотренный процесс ориентации повторится, но уже с весьма малой амплитудой колебательного процесса.

Таким образом устанавливается режим колебаний КЛА вокруг оси Z, характеризующийся угловыми скоростями, близкими к порогу чувствительности лазерного датчика угловых скоростей (угловые скорости в этом случае не будут превышать 0,01—0,001 *град/ч*). К тому же колебания будут происходить у границы поля зрения фотоэлектрического датчика при значениях угла β, практически близких к нулю.

Можно ожидать, что лазерные датчики угловых скоростей в ближайшее время станут неотъемлемой частью автоматических систем ориентации и стабилизации КЛА. Кроме того, лазерные датчики угловых скоростей могут быть использованы как базовые чувствительные элементы инерционных систем навигации, обеспечивающих ориентацию и стабилизацию КЛА на всех этапах полета.

3.4. Система косвенной стабилизации, управляемая датчиками угловой скорости

Косвенная стабилизация — это такая система, в которой некоторое устройство (орудие, прицел, телескоп) стабилизируется с помощью исполнительных двигателей, управляемых сигналами гироскопов. При этом их гироскопические свойства непосредственно для стабилизации не используются. В этом случае говорят, что устройство установлено на стабилизирующей платформе.

Гироскопические элементы в данном случае служат лишь для формирования сигналов, поступающих на усилители, управляющие стабилизирующими двигателями, которые в свою очередь так поворачивают платформу, что ее положение в пространстве не меняется.

В качестве чувствительных элементов в таких стабилизаторах обычно применяли двухстепенные электромеханические гироскопы. В настоящее время могут быть использованы и лазерные датчики угловых скоростей.

На рис. 25 показан двухосный косвенный стабилизатор корабельного телескопа, в котором в качестве чувствительных элементов используются лазерные гироскопы.

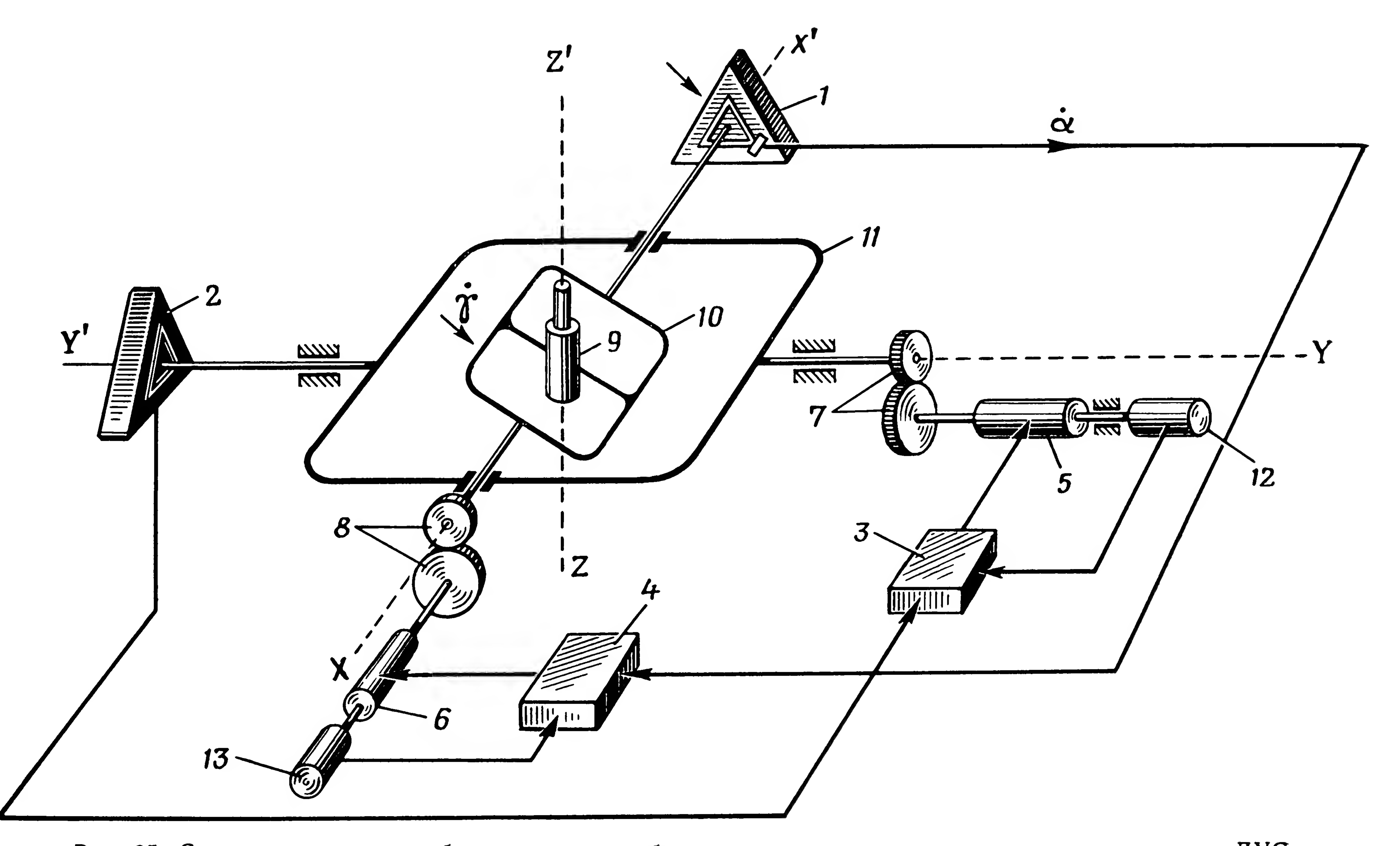


Рис. 25. Схема косвенного стабилизатора корабельного телескопа с использованием лазерных ДУС

В данном стабилизаторе лазерные датчики угловой скорости вырабатывают управляющие сигналы, пропорциональные абсолютным угловым скоростям разворота платформы по осям XX' и YY'.

Поскольку поворот телескопа вокруг направления на звезду (вокруг оси ZZ') не играет роли, стабилизация осуществляется только по двум осям.

Рассмотрим принцип работы такого стабилизатора по одной оси, например XX'.

При качке корабля с угловой скоростью $\dot{\Theta}$ платформа, на которой установлен телескоп *9* (в данном случае внутренняя рамка карданного подвеса *10*), поворачивается относительно качающегося судна с угловой скоростью $\dot{\gamma}$. Абсолютная угловая скорость платформы относительно инерциального пространства, которую измеряет лазерный ДУС *1*:

$$\dot{\alpha} = \dot{\Theta} - \dot{\gamma}.$$

Сигнал, соответствующий этой скорости, поступает на усилительно-преобразовательное устройство *4*. С выхода этого устройства снимается усиленный сигнал, пропорциональный углу поворота платформы относительно оси XX'. Далее сигнал поступает на двигатель *6*, который через редуктор *8* перемещает платформу в первоначальное положение.

Тахогенератор *13*, жестко связанный с двигателем, служит для компенсации сигнала, поступающего с датчика угловой скорости *1* на усилительно-преобразовательное устройство при перемещении платформы в исходное положение.

Аналогичным образом телескоп стабилизируется и по оси YY'.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей брошюре, безусловно, невозможно было рассмотреть все теоретические вопросы, связанные с лазерными гироскопами, подробно рассказать об их практическом применении. И хотя у гироскопов на лазерах уже сегодня достаточно хорошие технические характеристики, ученые многих стран продолжают исследования в этой области. С каждым годом все более и более совершенствуются лазерные гироскопы, уменьшаются их размеры, вес, увеличивается точность. Сфера применения гироскопов на лазерах все более расширяется.

Однако из сказанного ни в коей мере не следует, что гироскопы, основанные на других принципах работы, не будут применяться. Весьма перспективными являются электростатические, молекулярные и вибрационные гироскопы Будущее принадлежит приборам, которые рождаются сегодня.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Пестов Э. Г., Лапшин Г. М.** Квантовая электроника. М., Воениздат, 1972.

2. **Бакаляр А. И., Лукьянов Д. П.** Основы теории кольцевых лазерных гироскопов и их применение в навигационных комплексах. Л., изд. ЛВИКА, 1967.

3. **Стерлигов В. Л., Пожидаев О. А.** Гироскопы в транспортной технике. М., изд-во «Транспорт», 1969.

4. **Федоров Б. Ф.** Оптический гироскоп. М., изд-во «Знание», 1967.

5. **Хатчинсон, Инглима.** Конференция ассоциации авиапромышленников, США, август 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Анатолий Дмитриевич Богданов

ГИРОСКОПЫ НА ЛАЗЕРАХ

Редактор *В. Л. Стерлигов*
Художник *В. Е. Разумов*
Художественный редактор *Г. В. Гречихо*
Технический редактор *М. В. Федорова*
Корректор *Т. И. Былова*

Г-10723. Сдано в набор 31.1.72 г. Подписано к печати 4.09.72 г.
Формат бумаги 84 × 108 1/32. Печ. л. 2 1/4. (Усл. печ. л. 3,78). Уч.-изд. л. 3,636
Бумага типографская № 2. Тираж 13 200 экз.
Изд. № 6/3002 *Цена 13 коп.* Зак. 56

Ордена Трудового Красного Знамени
Военное издательство Министерства обороны СССР
103160, Москва, К-160
1-я типография Воениздата
103006, Москва, К-6, проезд Скворцова-Степанова, дом 3

13 к.

